BIOLOGÍA MARINA
La conducta animal en un mar acidificado

SALUD AMBIENTAL
Disruptores endocrinos: ¿cómo nos afectan?

MECÁNICA CUÁNTICA
Análisis crítico de Steven Weinberg

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2017 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de Scientific American

EL MULTIVERSO CUÁNTICO

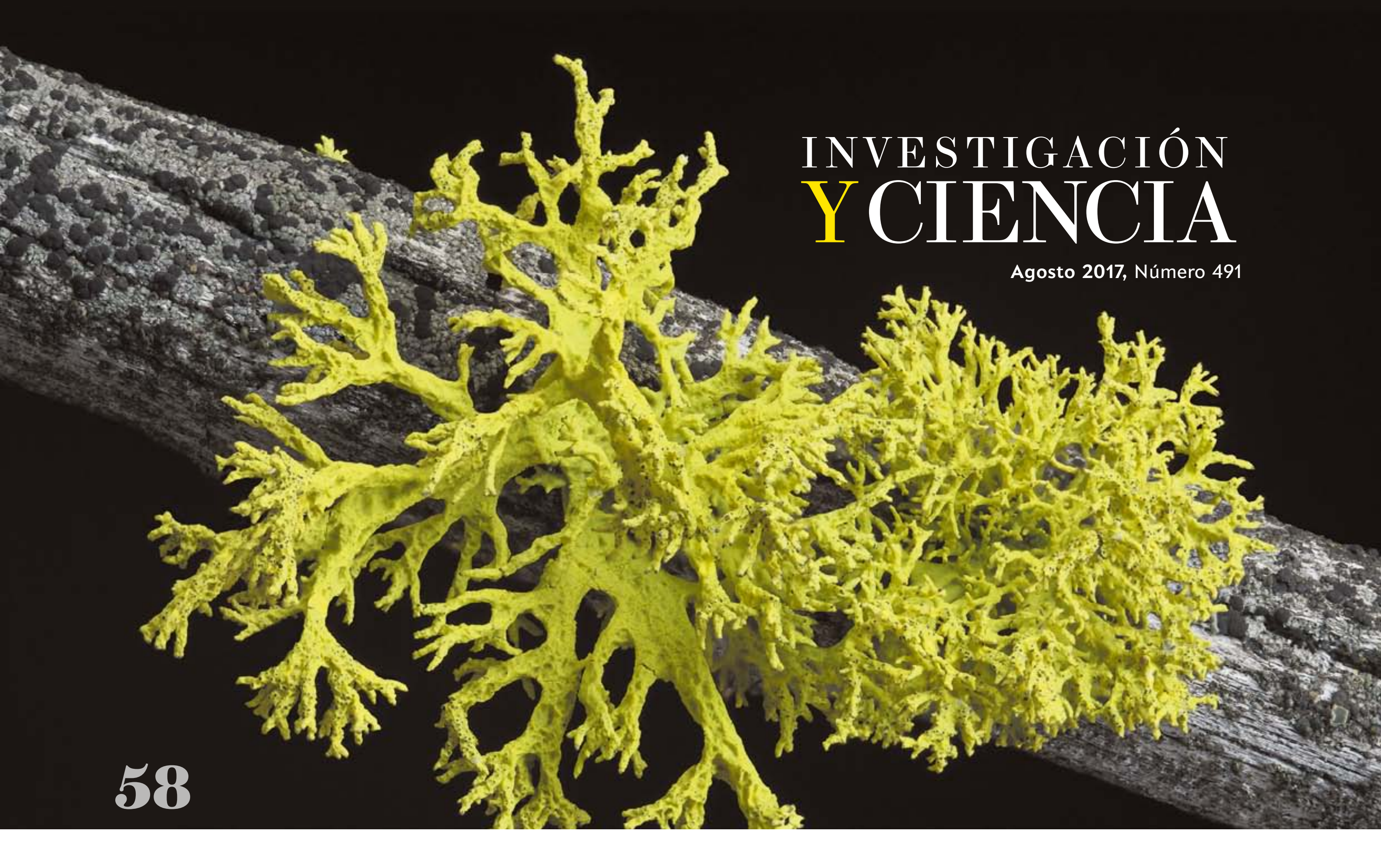
Una sorprendente conexión entre la cosmología y la mecánica cuántica podría revelar los secretos del espacio y el tiempo

ESPECIAL
EL GRAN ECLIPSE SOLAR
DEL 21 DE AGOSTO

EL MULTIVERSO CUÁNTICO | EL GRAN ECLIPSE SOLAR | DISRUPTORES ENDOCRINOS
AGOSTO 2017 N.º 491



6,90 EUROS



ARTÍCULOS

TIM WHEELER (*Letharia vulpina*)


4


44


82

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La teoría de la inflación cósmica sugiere que el universo observable no sería más que una parte de un dominio mucho mayor: el multiverso. En los últimos años, algunas investigaciones han hallado una conexión entre esta teoría cosmológica y una idea a priori muy distinta: la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica, una propuesta de 1957 para dar sentido a las leyes que rigen el mundo microscópico. Fotografía de The Voorhes.



redaccion@investigacionyciencia.es



Junio y julio de 2017

COMUNICACIÓN CIENTÍFICA Y DEMOCRACIA

En «Promover la confianza en la ciencia» [Investigación y Ciencia, junio de 2017], Anita Makri señala el problema que existe en uno de los eslabones más débiles de la cadena intelectual del hecho científico: el que se refiere a la comprensión del discurso científico por parte de la ciudadanía, elemento básico para su credibilidad. Como una causa de esa incomprensión ciudadana, la autora señala cierta forma de comunicar la ciencia basada en certezas absolutas. Y, a modo de solución, defiende una divulgación científica que, más que impartir doctrina, se base en «proporcionar [al público] las herramientas con las que pueda interpretar los datos, ver las incertidumbres con perspectiva y juzgar por sí mismo cómo contribuye la información científica a esclarecer la verdad». Y añade: «Si no se comunica con cuidado, la idea de que los científicos algunas veces "no saben" puede abrir la puerta a quienes quieren refutar la prueba científica».

Esta acertada y enriquecedora propuesta choca frontalmente con la organización social que impera hoy, donde el poder tiende a concentrarse en una élite que necesita el gregarismo social y la aceptación acrítica de sus «certezas», especialmente las relacionadas con la actividad científica. El planteamiento de la autora no solo se justifica con el fin de promover la confianza en la ciencia, sino con el de democratizarla, cosas, ambas, muy importantes.

Horacio Torvisco Pulido
Alcobendas, Madrid

¿UN MENSAJE EXTRATERRESTRE?

En el interesante artículo «El extraño comportamiento de la estrella de Tabby», de Kimberly Cartier y Jason T. Wright [Investigación y Ciencia, julio de 2017], se hace un exhaustivo repaso a las principales hipótesis que podrían explicar el anómalo comportamiento observado en el brillo de la estrella KIC 8462852. Una de las propuestas, la existencia de una megaestructura alienígena en torno al astro, es, por razones obvias, extraordinariamente atractiva e inspiradora.

Sin embargo, cabe considerar otra fuente alienígena para las variaciones observadas: la interposición deliberada de un objeto de grandes dimensiones en la línea de visión entre la Tierra y la estrella en cuestión, a una pequeña fracción de la distancia al astro. Dicho objeto constaría de una estructura ultraligera de tamaño descomunal (aunque muchísimo menor que las megaestructuras que se describen en el artículo) que, al variar su orientación o su grado de transparencia, podría dar cuenta de las variaciones rápidas de brillo.

Semejante estructura explicaría también la ausencia de reemisión de la energía absorbida en el infrarrojo. Y el movimiento a grandes velocidades en dirección a la Tierra podría explicar la paulatina disminución en el brillo de la estrella detectada a lo largo de años, ya que el tamaño angular del objeto estaría aumentando y, como consecuencia, lo mismo sucedería con la fracción de luz bloqueada.

El patrón de atenuación de la luz podría haber sido elegido para sobresalir entre el resto de las estrellas (algo ya conseguido) o para codificar algún tipo de mensaje. Esta estrategia de comunicación estaría diseñada específicamente para lograr un contacto con la Tierra por parte de una civilización que haya detectado actividad radioeléctrica de origen inteligente, lo que limitaría el posible origen del artefacto a un radio de unas decenas de años luz.

Una de las ventajas de este sistema de comunicación es que no dejaría pistas sobre el origen real de la civilización que estuviese intentando el contacto. Puede que se trate de una invitación a interceptar el objeto, algo solo posible para una civilización mucho más avanzada que la nuestra en la actualidad. La elección de esa estrella en particular tal vez no sea aleatoria: la ausencia de un sistema planetario que pudiese enmascarar el efecto buscado o una gran estabilidad intrínseca de su luminosidad aumentarían la probabilidad de detección.

La probabilidad de que algo así ocurra es muy baja, pero no parece mucho menor que la de otras hipótesis que impliquen a civilizaciones extraterrestres.

Joan Mercadé
El Prat de Llobregat, Barcelona

Responde Wright: *De hecho, esa hipótesis fue presentada por Luc F. A. Arnold en el trabajo que aparece citado en nuestro artículo («Transit light-curve signatures of artificial objects»,* The Astrophysical Journal, *vol. 627, págs 534-539, julio de 2005; disponible en arxiv.org/abs/astro-ph/0503580) y fue justamente lo que nos hizo pensar en el problema. Aunque no explicaría la ausencia de emisión infrarroja (la estructura aún se calentaría), y aunque la estrella de Boyajian se encuentra demasiado lejos para haber detectado nuestras señales de radio, dicho método de comunicación sería muy eficiente, ya que emplearía la propia estrella como transmisor. El contenido potencial de información de un sistema así fue analizado en nuestro artículo original donde identificábamos la estrella de Boyajian como uno de los objetivos del proyecto SETI («The Ĝ search for extraterrestrial civilizations with large energy supplies, IV: The signatures and information content of transiting megastructures»,* The Astrophysical Journal, *vol. 816, art. 17, enero de 2016; disponible en arxiv.org/abs/1510.04606).*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EL CEREBRO DE LOS PRIMATES está asombrosamente dotado para reconocer las caras. Ahora se está comenzando a descifrar el modo en que lo hace.

GETTY IMAGES

NEUROCIENCIA

Quedarse con la cara

Cada vez nos hallamos más cerca de desentrañar el código neural que rige el reconocimiento facial

El cerebro es capaz de reconocer y recordar infinidad de rostros. Reconocemos de inmediato el semblante de un amigo entre docenas de comensales en un restaurante abarrotado o entre la muchedumbre que transita por una calle céntrica. Y de un vistazo podemos saber si esa persona está nerviosa o enfadada, contenta o triste.

Los estudios de neuroimagen han revelado que varias regiones del tamaño de un guisante radicadas en el lóbulo temporal (la zona del cerebro situada bajo la sien) están especializadas en el reconocimiento de las caras. Los neurocientíficos las llaman áreas faciales. Pero ni las resonancias cerebrales ni los estudios clínicos de pacientes a los que se implantan electrodos explican exactamente cómo operan las neuronas de estas áreas.

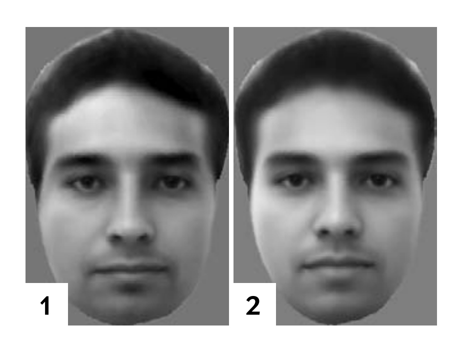
Ahora, gracias a la combinación de las neuroimágenes y los registros de la actividad eléctrica de neuronas aisladas, la bióloga Doris Tsao y sus colaboradores del Instituto de Tecnología de California parecen haber descifrado por fin el código neural del reconocimiento facial en el macaco y, por extensión, en los primates. Han descubierto que el ritmo de descarga de cada neurona del área facial corresponde a un rasgo distinto del rostro. Como a través de un tablero de control lleno de diales, las neuronas pueden regularse con precisión para responder a bits de información, que después combinan de diversas formas para crear una imagen de cada cara con la que el animal se topa. «Es asombroso», opina Tsao. «Los valores de cada dial son tan predecibles que podemos recrear el rostro que ve el mono sencillamente analizando la actividad eléctrica de sus neuronas faciales.»

Estudios precedentes ya apuntaban a la especificidad de esas zonas del cerebro que codifican los rostros. En la

década anterior, cuando Tsao cursaba una estancia como investigadora posdoctoral en la Escuela de Medicina de Harvard, comprobó con el electrofisiólogo Winrich Freiwald que las neuronas de las áreas faciales del mono emitían impulsos cada vez que este veía fotografías de un rostro, y que esas mismas células mostraban una actividad mínima o nula ante imágenes de otros objetos, como verduras, aparatos de radio u otras partes del cuerpo. Otros experimentos indicaban que las neuronas de esas regiones también distinguían un rostro de otro, aunque se tratara de dibujos.

En una conocida serie de experimentos con humanos realizada en 2005, el neurocientífico Rodrigo Quian Quiroga descubrió que los retratos de la actriz Jennifer Aniston activaban una sola neurona de la región del hipocampo, que pasó a ser llamada la neurona de Jennifer Aniston [*véase* «El archivo de la memoria», por Rodrigo Q. Quiroga, Itzhak Fried y Christof Koch; Investigación y Ciencia, abril de 2013]. Se creía que un proceso similar ocurría en algún punto del lóbulo temporal, si bien la teoría predominante sostenía que cada neurona de las áreas faciales era sensible a un grupo reducido de personas, afirma Quian Quiroga, ahora en la Universidad de Leicester y ajeno al estudio. Pero el reciente trabajo de Tsao sugiere que la idea podría resultar errónea. «Ha comprobado que las neuronas de las áreas faciales no codifican personas concretas; solo ciertos rasgos», comenta Quiroga. «Eso cambia por completo nuestra comprensión del reconocimiento facial.»

Para averiguar de qué modo las neuronas llevan a cabo esa labor de reconocimiento, Tsao y el posdoctorado Steven Le Chang generaron artificialmente 2000 retratos de identificación policiales con variaciones en 50 rasgos, como la redondez del rostro, la distancia entre los ojos o el tono y la textura de la tez.



EL ROSTRO original (*1*) presentado al macaco y el rostro predicho a partir de su actividad cerebral (*2*).

Enseñaron los retratos a dos monos al tiempo que registraban la actividad eléctrica de neuronas individuales situadas en tres áreas faciales de ambos.

Descubrieron que cada neurona respondía a un solo rasgo. En lugar de codificar el rostro de un individuo, como la neurona de Jennifer Aniston en el hipocampo, las neuronas del área facial dividían las imágenes en parcelas pequeñas y codificaban determinados rasgos, como el ancho de las entradas del cabello, explica Chang. Es más, las neuronas de diferentes áreas frontales procesaban información complementaria. Como los obreros de una fábrica, cada área desempeña una labor distinta y, junto con las demás, componen el retrato entero.

Una vez que Chang y Tsao supieron cómo tenía lugar esa división del trabajo, lograron predecir las respuestas de las neuronas ante una cara nueva. Elaboraron un modelo matemático en el que los rasgos faciales estaban codificados por varias neuronas. A continuación mostraron a los monos una imagen que no habían visto de un rostro humano (*1*). Con su algoritmo aplicado a varias neuronas, recrearon digitalmente el semblante que cada mono había visto (*2*). «Las recreaciones resultaron asombrosamente exactas», relata Tsao. Hasta el punto de ser casi indistinguibles de los retratos reales.

Y aún más sorprendente, solo precisaron las lecturas de un número bastante reducido de neuronas para que el algoritmo recreara con precisión las caras que estaban viendo los monos. Bastaron los registros de 205 neuronas: 106 en un área y 99 en otra. «Ello da una idea de lo compacto y eficaz que es este código neural basado en rasgos», afirma. También podría explicar por qué los primates sobresalimos tanto en el reconocimiento de las caras y distinguimos cientos de millones de personas sin que necesitemos un número igualmente ingente de neuronas de reconocimiento facial.

Los hallazgos, publicados en *Cell*, proporcionan un modelo sistemático y completo sobre el modo en que el cerebro percibe los rostros. La maquinaria cerebral humana guarda gran similitud con la de los monos, pues poseemos áreas faciales que responden como las suyas ante las imágenes, según se ha visto en los estudios de resonancia. Ahora bien, el número de estas áreas en nuestra especie podría diferir de la suya.

Entender el código facial del cerebro tal vez nos ayude a estudiar el modo en que las neuronas responsables incorporan otras señas de identificación, como el sexo, la edad, la raza, los signos emocionales y los nombres, afirma Adrian Nestor, neurocientífico de la Universidad de Toronto que estudia las áreas de reconocimiento facial en los humanos y no ha participado en la investigación. Incluso podría proporcionar la base para desentrañar el modo en que el cerebro procesa los rasgos no faciales. «Al fin y al cabo, este rompecabezas no concierne únicamente a los rostros. Esperamos que este código neural sea extensible al reconocimiento de todo tipo de objetos.»

—Knvul Sheikh

BIOQUÍMICA

Orugas devoradoras de plástico

Larvas que ingieren y degradan el polietileno podrían inspirar nuevas aplicaciones industriales

Cada año la humanidad produce más de 300 millones de toneladas de plástico. Casi la mitad acaba abocada en los vertederos y hasta 12 millones contaminan los mares. Hasta el momento no existe un modo sostenible de deshacerse de ellas, pero un novedoso estudio plantea una posible solución que radicaría en el estómago de una oruga voraz.

Investigadores del Instituto de Biomedicina y Biotecnología de Cantabria (IBBTEC) y de la Universidad de Cambridge han descubierto que las larvas de la polilla de la cera (*Galleria mellonella*) pueden degradar



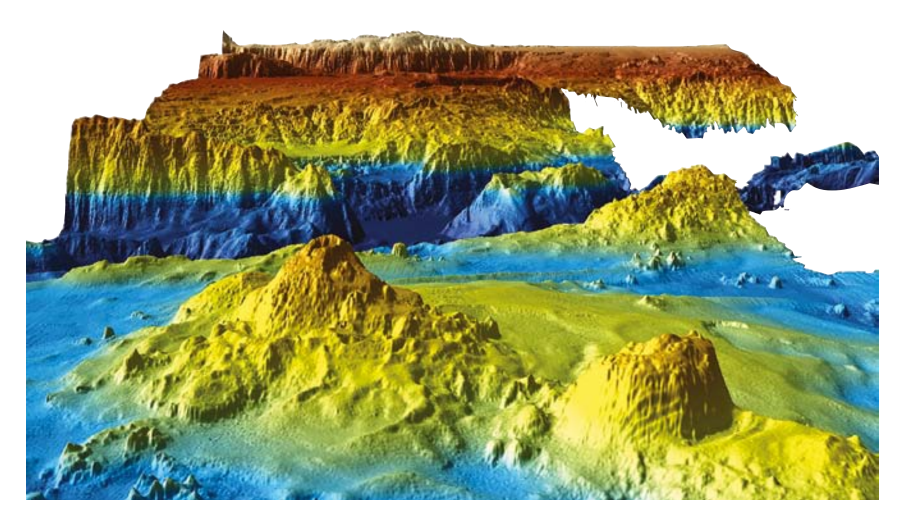
LA ORUGA de la cera mastica y descompone el plástico.

CORTESÍA DE STEVEN LE CHANG, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA *(caras)*; FEDERICA BERTOCCHINI, PAOLO BOMBELLI Y CHRIS HOWE *(oruga)*

OCEANOGRAFÍA

Territorio submarino desconocido

La búsqueda del avión desaparecido del vuelo MH370 ha permitido cartografiar una parte inexplorada del fondo del océano Índico



EL PRIMER ESTUDIO científico derivado de la búsqueda del avión de Malaysia Airlines desaparecido en 2014 ha revelado abruptas pendientes y cráteres en el fondo del océano Índico. La imagen muestra algunos detalles del escarpe Diamantina.

Cuando un vuelo de Malaysia Airlines desapareció en 2014, se dijo que la enorme zona submarina donde se estaba efectuando la búsqueda era principalmente plana. Ahora, sin embargo, el primer estudio científico derivado de aquellas pesquisas ha revelado la complejidad topográfica de una región apenas explorada del océano Índico sudoriental. Dicha zona incluye el punto en el que el subcontinente indio y los continentes australiano y antártico se separaron durante la fragmentación del supercontinente Gondwana. Con una resolución 500 veces mayor que la de las mediciones por satélite previas, los nuevos mapas han convertido borrosos grupos de píxeles en accidentes muy bien definidos: extrañas crestas y cráteres submarinos (*pockmarks*), así como una vasta meseta que termina en un abrupto precipicio con grandes corrimientos de tierra.

Los nuevos datos geofísicos, adquiridos con sónares de última generación instalados en barcos y sobre los que este año se publicó un artículo en *Eos*, abarcan 2500 kilómetros de lecho marino. «No cabe duda de que se trata de un conjunto de datos sin precedentes, tanto por la magnitud del área cartografiada como por lo que revela de una zona de suelo oceánico profundo que apenas había sido explorada», sostiene Kim Picard, autora principal del artículo y geocientífica marina de la Agencia de Geociencias de Australia.

Este organismo público tiene pensado hacer pública la primera remesa de datos hacia esta época del año, a los que seguirán más a mediados de 2018. Una vez que los mapas estén listos, los científicos podrán abordar todo tipo de preguntas aún abiertas sobre una región con una compleja historia tectónica. Uno de los misterios, explica Millard Coffin, coautor del estudio y geofísico marino de la Universidad de Tasmania, es una enigmática textura del lecho oceánico conocida como «tejido de expansión»: crestas pequeñas y alargadas que, por lo general, discurren en paralelo a fosas abiertas en el fondo marino donde dos placas se están separando, lo que permite que el magma ascienda. El fenómeno puede ser consecuencia de repetidos brotes de vulcanismo a lo largo de dorsales mediooceánicas; algo que, según investigaciones previas, estaría ligado a ciclos de edades de hielo y de calentamiento. La investigación de estas y otras características podría ayudar a dilucidar por qué la expansión del fondo oceánico ha sido más compleja en el Índico que en el Atlántico, apunta Coffin. La mejora de la resolución también permitirá entender mejor otros procesos del océano profundo, explica Picard, incluidos los corrimientos de tierra y los *pockmarks*, accidentes similares a cráteres y posiblemente causados por el escape de un fluido o gas desconocido.

La tragedia de Malaysia Airlines fue una de las más desgarradoras de la historia de la aviación: 239 personas desaparecieron sin que una larga búsqueda internacional fuese capaz de obtener indicios ni esclarecer las causas. A pesar de todo, como señala Coffin, «de ella están surgiendo todo tipo de nuevos conocimientos sobre el fondo marino».

—*Terri Cook*

---

con rapidez el polietileno, que supone el 40 por ciento del plástico fabricado. El equipo depositó 100 orugas de la polilla en una bolsa de compra comercial durante 12 horas, y en ese plazo engulleron y degradaron unos 92 miligramos, más o menos un 3 por ciento de ella. Para confirmar que la masticación de las larvas no era la responsable de la degradación del polietileno, los investigadores trituraron algunas de ellas hasta reducirlas a pasta y aplicaron esta sobre películas de plástico. Catorce horas después, las películas habían perdido el 13 por ciento de su masa, presumiblemente descompuesta por las enzimas digestivas de las larvas.

El análisis de las películas degradadas detectó pequeñas cantidades de etilenglicol, un producto resultante de la degradación del polietileno, lo que confirmaba que se había producido biodegradación. El descubrimiento ha sido publicado a inicios de año en *Current Biology*.

Uno de los autores, Federica Bertocchini, bióloga del IBBTEC, afirma que la capacidad de las larvas para digerir su alimento básico (la cera de abeja) también les permite digerir el plástico. «La cera es una mezcla compleja de moléculas, pero el enlace básico del polietileno, el que existe entre átomos de carbono, también lo es», explica. «La oruga de la cera desarrolló un mecanismo para romper ese enlace.»

Jennifer DeBruyn, microbióloga de la Universidad de Tennessee, ajena al estudio, afirma que no es ninguna novedad que un ser vivo descomponga el polietileno. Lo novedoso con respecto a estudios pasados es el ritmo de la degradación. En su opinión, el paso siguiente será identificar al responsable de la descomposición. ¿Se trata de una enzima sintetizada por la propia oruga o por su flora intestinal? Bertocchini coincide con ello y espera que el descubrimiento de su equipo permita utilizar algún día la enzima para descomponer tanto el plástico que acaba en los vertederos como el disperso en los mares. Pero vislumbra el uso de esa sustancia en algún tipo de proceso industrial, no meramente como «millones de orugas volcadas sobre el plástico».

—*Matthew Sedacca*

+ Información en nuestra web: **goo.gl/EgLNqd**

MEDIOAMBIENTE

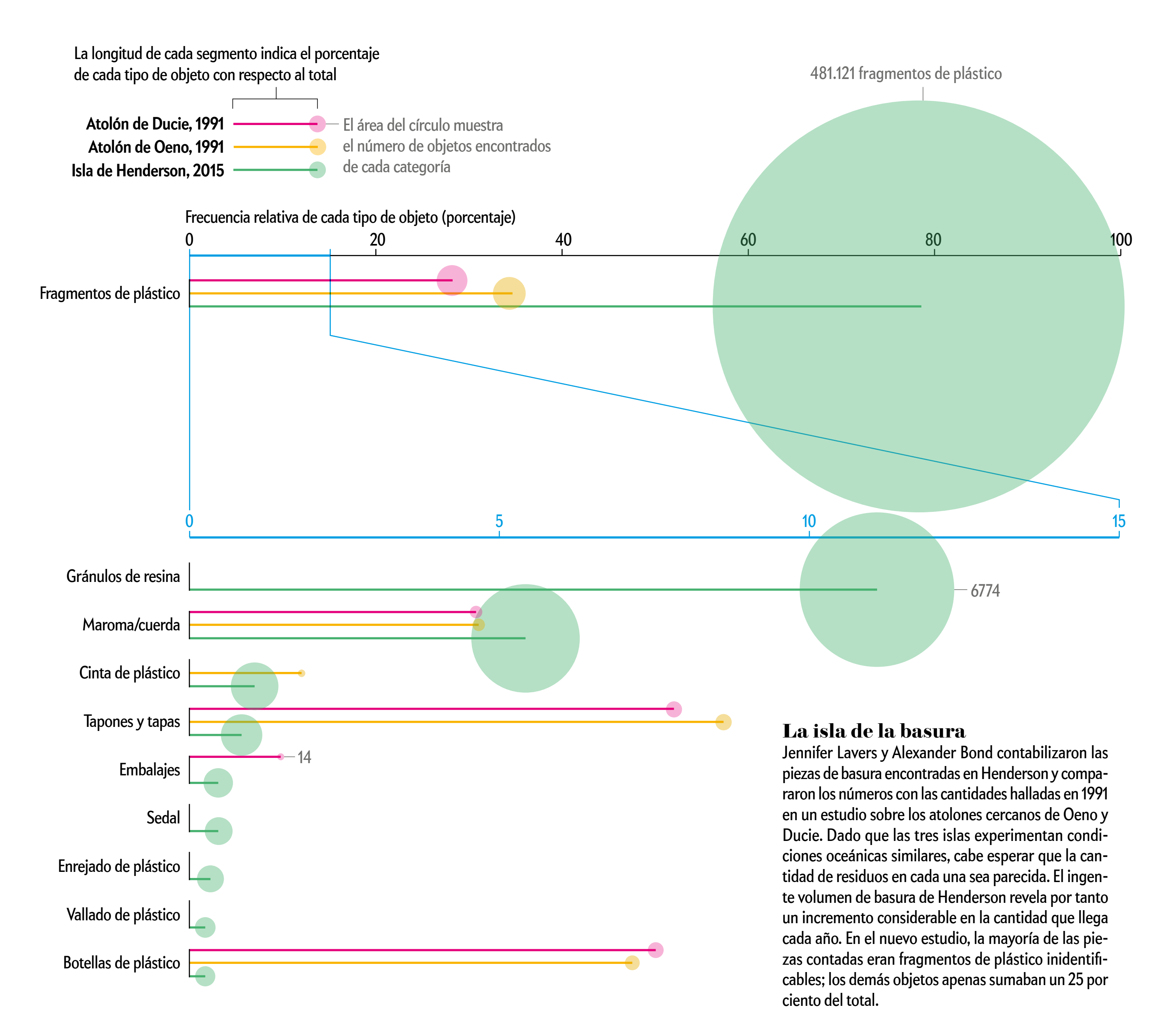
Una isla ahogada en plástico

Un atolón del Pacífico está cubierto por 18 toneladas de basura

La isla de Henderson, un diminuto y deshabitado atolón coralino del Pacífico Sur, apenas podía ser más remota: la ciudad más cercana se encuentra a unos 5000 kilómetros. Sin embargo, cuando Jennifer Lavers, ecotoxicóloga marina del Instituto de Estudios Marinos y Antárticos de Tasmania, se aventuró allí hace dos años para estudiar los intentos de erradicar roedores invasivos, se encontró con que ese lugar, declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO y antes intacto, estaba inundado de basura: 17,6 toneladas, según una estimación conservadora de la experta, casi todas ellas de plástico. (La basura se origina en otras partes, pero llega a Henderson por acción del viento y las corrientes oceánicas.) En un tramo especialmente sucio halló 672 piezas visibles de desechos por metro cuadrado, más otras 4497 enterradas en la arena en la misma área. Los detalles se han publicado en *PNAS*.

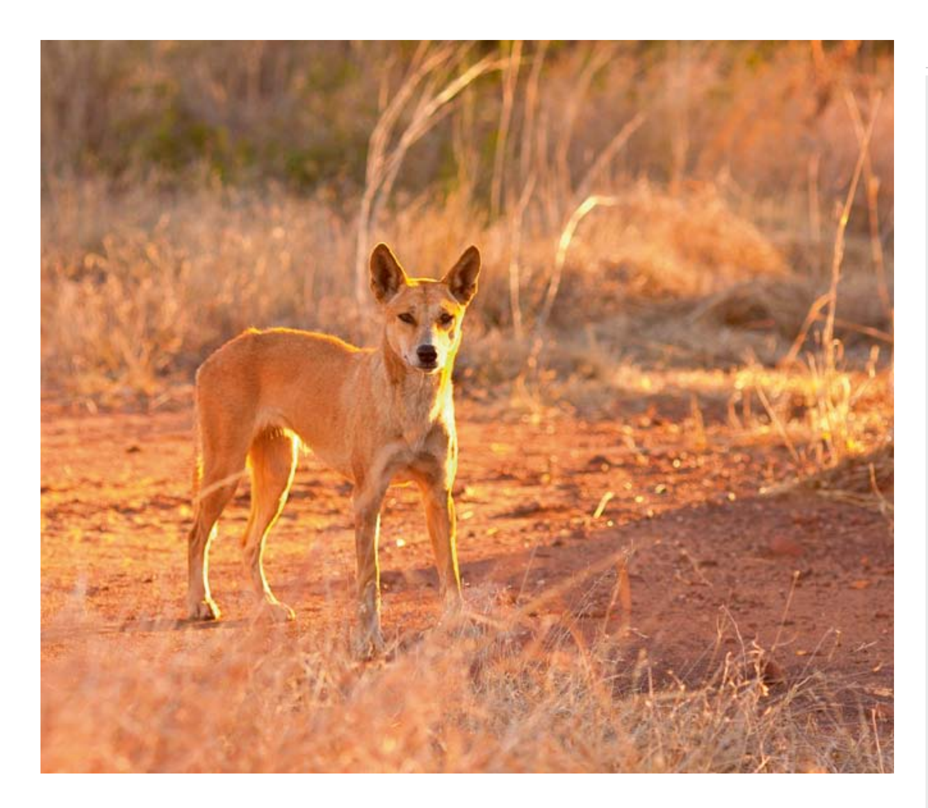
Al comparar los datos con los de un estudio de 1991 sobre los atolones de Ducie y Oeno, los investigadores concluyen que hay entre 200 y 2000 veces más basura en Henderson ahora que en esas dos islas vecinas en aquel entonces. Fragmentos de plástico no identificables, gránulos de resina y material de pesca formaban el grueso del total (*gráfica*), aunque también encontraron cepillos de dientes, chupetes, cascos de obra, pedales de bicicleta y un juguete sexual. Cada día llegan miles de nuevos objetos, lo que impide cualquier intento práctico de limpieza, explica Lavers. Mientras tanto, numerosas costas del mundo podrían enfrentarse a una amenaza similar. «Vaya a donde vaya, por lejos que esté de la sociedad, lo que me encuentro es plástico», concluye la investigadora.

—*Jesse Greenspan*



La isla de la basura
Jennifer Lavers y Alexander Bond contabilizaron las piezas de basura encontradas en Henderson y compararon los números con las cantidades halladas en 1991 en un estudio sobre los atolones cercanos de Oeno y Ducie. Dado que las tres islas experimentan condiciones oceánicas similares, cabe esperar que la cantidad de residuos en cada una sea parecida. El ingente volumen de basura de Henderson revela por tanto un incremento considerable en la cantidad que llega cada año. En el nuevo estudio, la mayoría de las piezas contadas eran fragmentos de plástico inidentificables; los demás objetos apenas sumaban un 25 por ciento del total.

AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); FUENTE: «EXCEPTIONAL AND RAPID ACCUMULATION OF ANTHROPOGENIC DEBRIS ON ONE OF THE WORLD'S MOST REMOTE AND PRISTINE ISLANDS», JENNIFER L. LAVERS Y ALEXANDER L. BOND EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 114, N.º 23, JUNIO DE 2017.



ECOLOGÍA

Especies invasoras en Australia

La isla-continente emprende su enésimo intento para erradicar uno de sus intrusos

A inicios de año, el Gobierno australiano liberó una cepa de virus hemorrágico con la esperanza de frenar el crecimiento de la población de conejos en la isla. Esta jugada puede parecer bárbara, pero las autoridades calculan que los animales, introducidos por los colonizadores británicos a finales del siglo XVIII, causan daños en los cultivos por valor de 115 millones de dólares cada año. Pero el problema no acaba aquí. Desde hace más de un siglo, los australianos han combatido sucesivas oleadas de especies invasoras con numerosas medidas desesperadas, como la introducción de depredadores alóctonos, todo con magros resultados.

Australia no es el único país afectado por las especies invasoras, pero, por su condición de continente aislado, la mayor parte de su fauna y su flora es endémica, y los superdepredadores hace mucho que se extinguieron. Ello ofrece a las especies recién llegadas grandes oportunidades para prosperar. «En otros lugares el número de depredadores es mucho mayor», aclara Euan Ritchie, uno de los directores de la Sociedad Australiana de Ecología. Pero el tigre de Tasmania, el león marsupial y *Megalania* (un lagarto de 600 kilogramos) son cosa del pasado. El único superdepredador superviviente, el dingo (*fotografía*), está amenazado por los humanos a causa de su predilección por el ganado ovino. Aparte de los conejos, Australia está intentando poner coto al zorro común (importado como trofeo de caza), a los gatos asilvestrados (descendientes de los animales de compañía), la carpa (criada en piscifactorías) e incluso los camellos (usados como montura para viajar por el desierto). Los responsables de la gestión ambiental han intentado combatirlos liberando virus, esparciendo veneno, levantando miles de kilómetros de vallado e incluso dándoles caza desde helicópteros.

En un caso célebre, la solución tomada acabó convirtiéndose en un problema: el sapo marino fue introducido en 1935 para devorar los escarabajos que dañaban la caña de azúcar. Pero este anfibio no puede trepar a las cañas para atraparlos y se ha convertido él mismo en una plaga. A pesar de las protestas de los científicos, el Gobierno planea introducir otro virus este año para intentar reducir el crecimiento sin control de la población de carpas. «No es posible volver al pasado. Pero tenemos muchos mamíferos autóctonos y otras especies que debemos proteger», afirma Ritchie.

—Erin Biba

GETTY IMAGES (*dingo*); MUSEO DE LA CIENCIA DE LONDRES (*robot*)

AGENDA

EXPOSICIONES

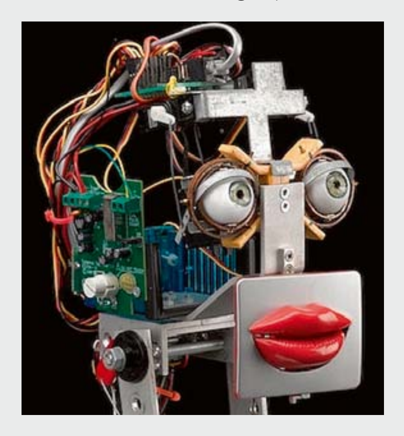
Hasta el 13 de agosto
De la Tierra al universo
Sala Galería Palacio del Castillo
Bornos (Cádiz)
fundaciondescubre.es

Ciencia de acogida
Centro Cibeles de Cultura
y Ciudadanía
Madrid
cienciadeacogida.org/es

Cuando la ciencia se hizo de juguete: Un siglo del juguete científico español (1880-1980)
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

Biología evolutiva
CosmoCaixa
Barcelona
agenda.obrasocial.lacaixa.es

Robots
Museo de la Ciencia
Londres
beta.sciencemuseum.org.uk/robots



OTROS

Talleres
Talleres infantiles de verano
Astronomía, zoología, juegos ópticos, física y electricidad
Para niños de entre 5 y 12 años
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logroño.es/casadelasciencias

Talleres
Verano en el MUNCYT
Astronomía, genética, tecnología, biotecnología, física y electricidad
Talleres para niños de entre 6 y 12 años
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es

ALTAS ENERGÍAS

¿Indicios de nueva física en el LHC?

Varios resultados independientes sobre desintegraciones de mesones *B* muestran persistentes desviaciones con respecto a las predicciones del modelo estándar

JOAQUIM MATIAS

El modelo estándar de la física de partículas describe con enorme precisión el comportamiento de los constituyentes elementales de la materia. Sin embargo, y a pesar de su belleza, simplicidad y espectaculares éxitos experimentales, sabemos que no puede ser una teoría completa: no solo no incluye la gravedad, sino que tampoco consigue explicar varias cuestiones fundamentales, como el origen de la asimetría entre materia y antimateria o la naturaleza de la materia oscura. Por esa razón, hace tiempo que los físicos pensamos que ha de existir una teoría más fundamental que el modelo estándar, a la que solemos referirnos con el apelativo genérico de «nueva física». Pero ¿existe algún indicio experimental que nos revele cómo podría ser dicha teoría? Desde hace cuarenta años, la respuesta a esta pregunta ha sido negativa.

Hace poco, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN y el acelerador japonés KEKB han obtenido resultados esperanzadores en esa dirección. Varios experimentos independientes han observado que la desintegración de ciertas partículas conocidas como mesones *B* no parece ajustarse a las predicciones del modelo estándar. En caso de confirmarse, tales anomalías supondrían un cambio de paradigma en la física fundamental.

Dos vías de exploración

En el LHC se aceleran protones hasta velocidades muy próximas a la de la luz y se hacen colisionar entre sí. Como producto de esos choques, se generan nuevas partículas que a su vez se desintegran en otras, las cuales llegan a los detectores. El análisis de esos productos de desintegración permite deducir en parte qué procesos físicos han tenido lugar en la colisión.

En este contexto existen dos vías para buscar indicios de nueva física. La primera es la llamada búsqueda directa, consistente en crear, a partir de la energía liberada en los choques, partículas hasta ahora desconocidas. Un ejemplo perfecto de dicha estrategia fue la búsqueda del bosón de Higgs. Sin embargo, este método se encuentra fuertemente limitado por la energía disponible para generar la nueva partícula.

La segunda vía son las búsquedas indirectas, las cuales se basan en estudiar con detalle ciertas desintegraciones. Si en ellas intervienen partículas virtuales distintas de las del modelo estándar, las observaciones no concordarán por completo con las predicciones de este. Esta técnica cuenta con la ventaja de que, para «crear» una partícula virtual, no hace falta disponer de toda la energía equivalente a la masa de la partícula, sino que basta con energías menores. No obstante, no podremos determinar de forma unívoca de qué partícula se trata, sino solo algunas de sus características.

Algunas partículas hoy bien conocidas, como los quarks *c* o *t*, fueron detectadas primero por esta segunda vía. La existencia del quark *c*, por ejemplo, fue predicha en 1970 debido a que no se observaba la desintegración de un kaón en un muon y un antimuón, la cual en principio debía producirse. Dicha ausencia podía explicarse por la mediación de un quark *c* virtual. Más tarde, en 1974, la partícula fue descubierta mediante búsqueda directa.

Física exótica en mesones *B*

Un ejemplo prominente de estas búsquedas indirectas lo hallamos en las desintegraciones raras de mesones B_d. Estas partículas, formadas por un antiquark *b* y un quark *d*, pueden desintegrarse para dar lugar a distintos productos finales, algunos de los cuales solo se generan un pequeñísimo porcentaje de las veces. Ello convierte a estos modos de desintegración en candidatos ideales para observar posibles efectos de nueva física, que, de otra forma, quedarían enmascarados por los procesos dominantes del modelo estándar.

Un caso de especial importancia son las ocasiones en las que un mesón B_d se desintegra en una partícula llamada K^{*0}, un muon y antimuón. Sin embargo, el estudio teórico de este proceso reviste varias complicaciones, ya que requiere tener en cuenta el intercambio de gluones y quarks en un régimen en el que sus efectos resultan muy difíciles de calcular. Estas incertidumbres se conocen con el nombre de «incertidumbres hadrónicas».

En 2005, en colaboración con Frank Krüger, de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Múnich, y posteriormente en 2012 y 2013, junto con otros investigadores, propusimos un nuevo tipo de observables (cantidades medibles en los experimentos) para analizar esta desintegración superando los esquemas tradicionales. Dichos observables se basaban en estudiar de una manera precisa la distribución angular de las partículas producidas en la desintegración, así como su energía. Su ventaja residía en que proporcionaban mediciones mucho más sensibles a las posibles contribuciones de nueva física, ya que, por construcción, evitaban algunas de las incertidumbres hadrónicas mencionadas.

En 2013, el experimento LHCb, uno de los cuatro grandes detectores del LHC, analizó la desintegración de mesones B_d atendiendo a los criterios propuestos en nuestros trabajos. Con datos correspondientes a un billón (10^{12}) de colisiones protón-protón, los resultados asociados al observable que habíamos bautizado como P_5' mostraron una diferencia de 3,7 desviaciones estándar con respecto a las predicciones del modelo estándar: en otras palabras, la probabilidad de obtener dicho resultado sin recurrir a nuevos fenómenos físicos era del 0,02 por ciento. Esto tuvo un fuerte impacto en la comunidad, acostumbrada a encontrar un excelente acuerdo entre los experimentos y las predicciones del modelo estándar.

La anomalía persiste

En aquel momento se barajaron dos posibilidades: o bien un problema en el cálculo de las incertidumbres hadrónicas, o bien que todo se debiese a una fuerte fluctuación estadística (del estilo de lanzar 12 monedas y obtener 12 caras seguidas: algo muy poco probable, pero no imposible).

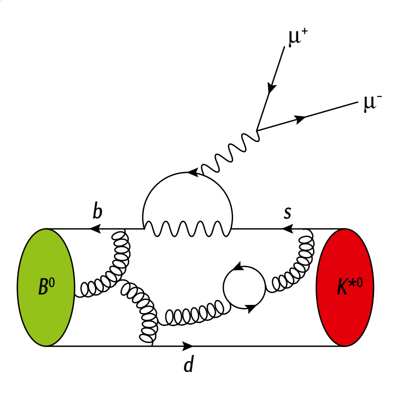
UNA DESINTEGRACIÓN POCO COMÚN

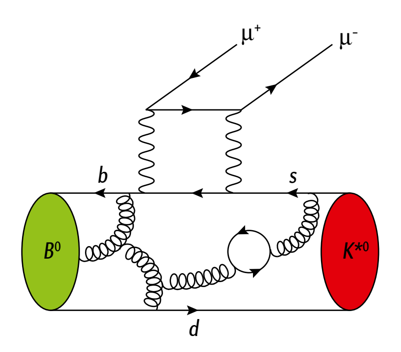
Varios experimentos efectuados en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) y el acelerador japonés KEKB han identificado una serie de desintegraciones cuyos detalles no parecen ajustarse por completo a las predicciones teóricas. En caso de confirmarse, constituirían la primera señal de nueva física más allá del modelo estándar, la teoría que los físicos llevan usando cuarenta años para describir los constituyentes elementales de la materia.

Las anomalías observadas atañen a las desintegraciones de mesones *B*, partículas formadas por ciertas combinaciones de dos quarks. Guardan relación con la distribución angular y la energía de las partículas emitidas en la desintegración, así como con una desproporción inesperada entre el número de desintegraciones en las que se producen muones y aquellas en las que se generan electrones.

Se han considerado tres posibilidades para explicar estas discrepancias: que se trate de una mera fluctuación estadística; que las predicciones del modelo estándar no hayan sido calculadas con la exactitud suficiente debido a la complejidad del proceso; o que haya nuevos procesos físicos detrás. La persistencia de desviaciones en varios experimentos independientes hace poco plausible la primera opción. Otros análisis desfavorecen la segunda.

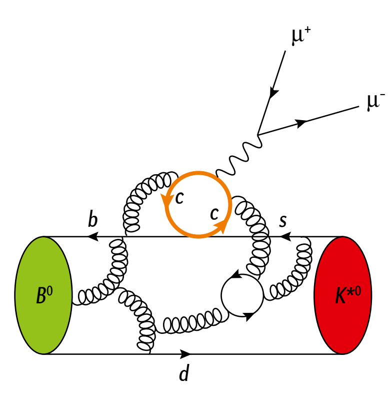
Los esquemas siguientes muestran varios de los diagramas de Feynman empleados para describir la desintegración del mesón B_d (*verde*) en una partícula llamada K^{*0} (*rojo*), un muon (μ^-) y un antimuón (μ^+).





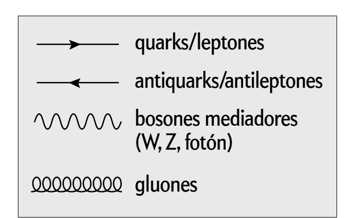
Un proceso complejo

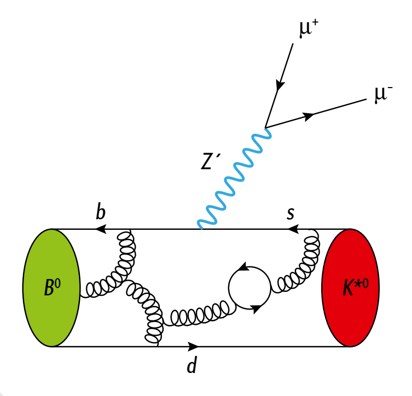
El mesón B_d se compone de un quark de tipo *d* y de un antiquark de tipo *b*. En las desintegraciones mostradas aquí, el antiquark *b* se transforma en un antiquark de tipo *s* (uno de los integrantes de la partícula K^{*0}), un muon y un antimuón. El proceso completo se explica mediante el intercambio de múltiples partículas virtuales, lo que complica el cálculo de las predicciones teóricas.

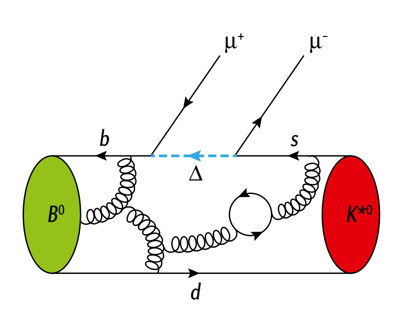


Incertidumbres

Una contribución particularmente difícil de calcular es la representada en este diagrama, donde se produce un bucle de quarks de tipo *c*. Hasta hace poco se pensaba que la incertidumbre teórica asociada a este proceso tal vez fuese responsable de las desviaciones observadas. Sin embargo, varios experimentos demostraron que las anomalías persistían en un tipo de medición en la que este intercambio de quarks *c* no desempeña ningún papel.







¿Nueva física?

Hay dos hipótesis genéricas que podrían explicar los resultados. Una de ellas postula que en estas desintegraciones se produce un «bosón *Z*′», una partícula neutra mediadora de una nueva interacción fundamental de la naturaleza (*izquierda*). Otra se basa en la existencia de «leptoquarks» (Δ), un hipotético tipo de mediadores entre leptones y quarks (*derecha*).

JULIA MATIAS Y JANA MATIAS (*diagramas*)

La primera posibilidad apuntaba a dos tipos de argumentos: algún problema en la precisión en los cálculos que se usaban para describir la desintegración, o algún tipo de corrección desconocida y muy difícil de calcular asociada a procesos virtuales con quarks *c*. Fue relativamente sencillo demostrar que la precisión de los cálculos era la correcta. En cuanto al segundo argumento, si bien es imposible descartarlo por completo, más tarde apareció un resultado experimental inesperado que lo hacía poco plausible.

La posibilidad de que se tratase de una fluctuación estadística quedaba en manos de los experimentos posteriores: de ser el caso, la acumulación de nuevos datos (el lanzamiento de más monedas, en el ejemplo anterior) haría que poco a poco los resultados convergiesen hacia las predicciones del modelo estándar.

En 2015, LHCb presentó un nuevo análisis del observable P_5', esta vez con datos correspondientes a tres billones de colisiones protón-protón. Los resultados exhibieron la misma desviación que en 2013. Un año después, el experimento Belle, en el acelerador japonés KEKB, volvió a confirmarla. Y el pasado mes de abril, los experimentos ATLAS y CMS, otros dos detectores del LHC, mostraron en sendos resultados muy preliminares que también podían llevar a cabo tales medidas, especialmente complejas en este tipo de detectores. Los resultados de ATLAS parecen estar en línea con los del resto de los experimentos, mientras que CMS es el único que ha hallado un mejor acuerdo con el modelo estándar. Ambos análisis, aún sin publicar, se encuentran en estos momentos bajo revisión.

En cuanto a las diferencias existentes entre estos experimentos, cabe señalar que hay dos grandes estrategias para estudiar las desintegraciones de mesones *B*. Las llamadas «fábricas de *B*», como Belle, hacen colisionar electrones y positrones con la energía justa para producir grandes cantidades de mesones *B* (al tratarse de partículas verdaderamente elementales, los choques entre electrones y positrones producen resultados mucho más limpios que los choques entre protones). El segundo método se basa en emplear colisionadores de hadrones, como el LHC, que, al hacer chocar partículas mucho más masivas que los electrones, pueden alcanzar energías más elevadas.

En lo que se refiere al LHC, el detector LHCb fue diseñado para identificar con gran precisión tanto los mesones *B* como sus productos de desintegración. ATLAS y CMS, basados en una tecnología muy distinta, cuentan también con un interesante programa de estudio de mesones *B*, si bien no pueden analizar su desintegración en electrones, un aspecto clave por lo que veremos a continuación.

Otro resultado inesperado

En 2014, antes de que se publicasen los últimos datos relativos a las desintegraciones de mesones B_d, otro resultado de gran importancia llegó, de nuevo, del experimento LHCb. Se trataba de la medida de un observable distinto: el cociente entre el número de desintegraciones de un mesón B^+ en un kaón K^+ y en una pareja muon-antimuón, y el número de desintegraciones en el mismo kaón y una pareja electrón-positrón.

El muon puede entenderse como una versión pesada del electrón: su masa es unas 200 veces mayor, pero por lo demás ambas partículas son muy similares. Dado que las energías aquí implicadas son mucho mayores que la masa del muon o del electrón, ambas desintegraciones (en muones o en electrones) deberían mostrar prácticamente el mismo comportamiento. Por tanto, el número de desintegraciones de mesones B^+ en muones debería ser casi idéntico al de desintegraciones en electrones. Sin embargo, los datos de LHCb mostraron un déficit de muones considerable: por cada 100 desintegraciones en electrones, solo se observaron unas 75 en muones.

Las implicaciones de este resultado eran profundas. En primer lugar, la predicción teórica de este observable es muy limpia, ya que básicamente todas las incertidumbres hadrónicas se anulan entre sí, lo que invalida cualquier argumento basado en tales incertidumbres para explicar este tipo de observables. En particular, los procesos con quarks *c* virtuales a los que habíamos aludido más arriba quedaban descartados también, ya que en este caso sus efectos se cancelan exactamente. Por último, la misma explicación de nueva física que permitía dar cuenta de las primeras anomalías en P_5' también podía explicar las nuevas, siempre y cuando los efectos de nueva física afectaran más a los muones que a los electrones (como los datos apuntaban), lo que ponía en jaque los argumentos basados en las incertidumbres hadrónicas.

El pasado 18 de abril, el CERN anunció los primeros resultados de la medida de un observable similar: el cociente entre el número de desintegraciones de B_d en K^{*0} y una pareja muon-antimuón, y el del proceso correspondiente con electrón-positrón. Una vez más se observaron valores inferiores a la unidad, coherentes con los anteriores y con una significancia estadística similar.

Análisis global de observables

¿Cómo podemos saber si todas estas anomalías, caracterizadas por diferencias de entre 2,5 y 3 desviaciones estándar con respecto a las predicciones del modelo estándar, constituyen indicios genuinos de nueva física? La herramienta principal para discernirlo es lo que denominamos un análisis global de observables.

Los observables que han de incluirse en este examen son todas aquellas desintegraciones de mesones *B* que están gobernadas por la misma conversión de un antiquark *b* en un antiquark *s* y dos leptones (electrones o muones) o un fotón. Todas ellas quedan parametrizadas por ciertas cantidades, llamadas coeficientes de Wilson, las cuales permiten encapsular los posibles efectos de nueva física.

En este análisis se comparan dos hipótesis para explicar los datos: que los efectos observados se deban exclusivamente al modelo estándar, o que haya contribuciones debidas a nuevos procesos físicos. Si los datos quedan mejor descritos por una determinada hipótesis de nueva física, obtendremos una significancia estadística elevada con respecto a las predicciones del modelo estándar. Si la significancia es baja, quiere decir que la hipótesis de nueva física considerada no explica mejor los datos y hay que descartarla.

Según los resultados de nuestro equipo de investigación, publicados el pasado 18 de abril en el repositorio de artículos científicos arXiv, el modelo estándar queda desfavorecido en este análisis global por más de 5 desviaciones estándar con respecto a la hipótesis de nueva física propuesta. Por su parte, la violación de la universalidad leptónica está favorecida con respecto a la de universalidad (que muones y electrones se comportan igual) por más de 3 desviaciones estándar, en función de la hipótesis de nueva física.

Posibles explicaciones

Estas intrigantes anomalías admiten varias explicaciones en términos de nueva física. Una de las que mejor describirían los datos sería la existencia de una nueva partícula, apodada en términos genéricos «bosón Z'», la cual sería similar al familiar bosón *Z* (el mediador neutro de la

interacción electrodébil) pero responsable de una nueva fuerza de la naturaleza. Un gran número de propuestas teóricas para extender el modelo estándar predicen desde hace tiempo la existencia de este tipo de partículas.

Otra opción sería la existencia de «leptoquarks», una nueva clase de partículas que tendrían carga tanto fuerte como electrodébil y que mediarían entre leptones y quarks. Dichas partículas han sido predichas por algunos modelos de unificación, entre otras propuestas teóricas.

El futuro de este campo se antoja emocionante y prometedor. Tanto LHCb como Belle II, el sucesor de Belle, tienen previsto realizar una larga lista de mediciones complementarias para confirmar o descartar la violación de la universalidad leptónica. El último paso consistirá en buscar de forma directa las hipotéticas nuevas partículas en los detectores ATLAS, CMS o ambos, suponiendo que el LHC pueda aportar la energía suficiente para producirlas.

En caso de confirmarse estos indicios experimentales nos hallaríamos a las puertas de una nueva era en física fundamental. Con todo, por el momento solo cabe ser prudentes y aguardar con paciencia los resultados que la colaboración LHCb hará públicos durante los próximos meses.

—Joaquim Matias
Universidad Autónoma de Barcelona
Instituto de Física de Altas Energías

PARA SABER MÁS

Optimizing the basis of $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ observables in the full kinematic range. Sébastien Descotes-Genon et al. en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2013, n.º 5, art. 137, mayo de 2013.
Measurement of form-factor-independent observables in the decay $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$. Colaboración LHCb en *Physical Review Letters*, vol. 111, art. 191.801, noviembre de 2013.
Test of lepton universality using $B^+ \rightarrow K l^+ l^-$ decays. Colaboración LHCb en *Physical Review Letters*, vol. 113, art. 151.601, octubre de 2013.
Patterns of new physics in $b \rightarrow s l^+ l^-$ transitions in the light of recent data. Bernat Capdevila et al. en **arxiv.org/abs/1704.05340**, abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La búsqueda del bosón de Higgs. Martine Bosman y Teresa Rodrigo en *IyC*, septiembre de 2012.
Las enigmáticas propiedades de los gluones. Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan en *IyC*, julio de 2015.
El extraño comportamiento del quark *cima*. Juan Antonio Aguilar Saavedra en *IyC*, abril de 2016.

NANOTECNOLOGÍA

Nanogeneradores

Nuevas técnicas de diseño y fabricación prometen hacer realidad la posibilidad de absorber la energía mecánica del entorno para alimentar todo tipo de nanodispositivos

GONZALO MURILLO

La piezoelectricidad es el fenómeno responsable de producir una chispa cuando accionamos el pulsador de un mechero. En su interior, un material cristalino, como el cuarzo, genera un campo eléctrico cuando una deformación mecánica produce una asimetría en la distribución de cargas. Este efecto, conocido desde la Grecia clásica, encuentra hoy múltiples aplicaciones: desde el cristal resonador de nuestro nuevo ordenador hasta el micrófono de los teléfonos móviles. En general, los materiales piezoeléctricos permiten convertir deformaciones mecánicas en tensiones eléctricas; es decir, energía mecánica en electricidad.

Era de esperar que algún día ese concepto se usara también para generar energía eléctrica útil. A fin de cuentas, cuando hablamos de un «generador», en realidad nos estamos refiriendo a un conversor que transforma energía de cualquier tipo (química, solar, mecánica...) en energía eléctrica. Si nos centramos en fuentes de energía que pasan desapercibidas y que normalmente desperdiciamos en forma de vibraciones o movimientos cotidianos, estaremos hablando de recolección de energía ambiental (*energy harvesting*).

Esta posibilidad ha sido objeto de intenso estudio en los últimos años. Especialmente interesantes resultan las aplicaciones orientadas hacia la autoalimentación de los pequeños sensores inalámbricos que permitirían hacer realidad la futura «Internet de las cosas», en la que millones de sensores y dispositivos inteligentes a nuestro alrededor se comunicarán entre sí. Hoy por hoy, estos aparatos electrónicos suelen funcionar con baterías o pilas; sin embargo, si su número aumenta de manera exponencial, el reemplazo o recarga de dichas baterías se tornará inviable.

Una alternativa muy atractiva —y mucho más sostenible— consistiría en alimentar tales dispositivos a partir de la energía mecánica que de otro modo se disiparía al entorno. A tal fin se están explorando sistemas nano- y microelectromecánicos que permiten integrar en un mismo microchip el dispositivo electrónico y un pequeño generador. Una serie de avances logrados a lo largo de los últimos años auguran la posibilidad de integrar estas técnicas en nuestra vida cotidiana mediante todo tipo de aplicaciones, desde ropa inteligente hasta prometedores usos en biomedicina.

El reto de la fabricación

Algunos de los materiales piezoeléctricos más comunes son el cuarzo, el nitruro de aluminio (AlN), el titanato circonato de plomo (más conocido como PZT) o el óxido de zinc (ZnO). En la última década, el ZnO ha ganado una gran popularidad debido fundamentalmente a dos razones: la variedad de nanoestructuras que pueden crearse con él, y la combinación de sus propiedades como material semiconductor, fotónico y piezoeléctrico.

Una de las nanoestructuras de ZnO más usadas es el nanohilo: pequeños cables de espesor nanométrico y con una longitud del orden de micrómetros. En 2006, Zhong Lin Wang y Jinhui Song, del Instituto de Tecnología de Georgia, demos-

traron que las deformaciones de un nanohilo de ZnO generaban una diferencia de potencial a su través, un hito que supuso la primera prueba de concepto de un nanogenerador. Desde entonces, un elevado número de publicaciones ha seguido esta línea de investigación. Hoy sabemos que diferentes agrupaciones de nanohilos de ZnO permiten generar densidades de potencia lo bastante elevadas para permitir la recolección de energía útil a partir de los movimientos del cuerpo humano y otras fuentes de energía mecánica.

Sin embargo, las técnicas actuales de fabricación de nanohilos de ZnO adolecen de ciertos problemas de uniformidad y reproducibilidad del crecimiento, con enormes variaciones en el resultado. Por esa razón, buena parte de la investigación se centra en la mejora de los métodos de fabricación conocidos y en la obtención de nuevos tipos de nanoestructuras.

En la actualidad, el método más simple y económico para hacer crecer nanoestructuras de ZnO es la síntesis hidrotérmica. Esta técnica se basa en el empleo de una disolución acuosa de nitrato de zinc y una base débil, la cual permite la precipitación gradual de estructuras nanométricas de ZnO cuando la temperatura aumenta por encima de los 40 o 50 grados centígrados.

Por regla general se usa una capa catalítica, o «capa semilla», para favorecer la nucleación de nanoestructuras. En el crecimiento de nanohilos suelen usarse capas finas de oro, óxido de zinc o acetato de zinc. El oro presenta la ventaja de que, además de catalizar el proceso, sirve también de electrodo, lo que permite recolectar las cargas producidas por el efecto piezoeléctrico en caso de que el dispositivo se use como nanogenerador.

No obstante, la superficie de oro se ve fácilmente afectada por factores ambientales, lo que enseguida merma sus propiedades catalíticas. En un trabajo publicado este año en *Nanoscale Research Letters*, nuestro grupo de investigación ha propuesto un método de activación química que, en esencia, limpia la superficie de oro y restaura su capacidad catalítica. Esta activación, basada en métodos típicos usados en electroquímica, se lleva a cabo mediante soluciones alcalinas.

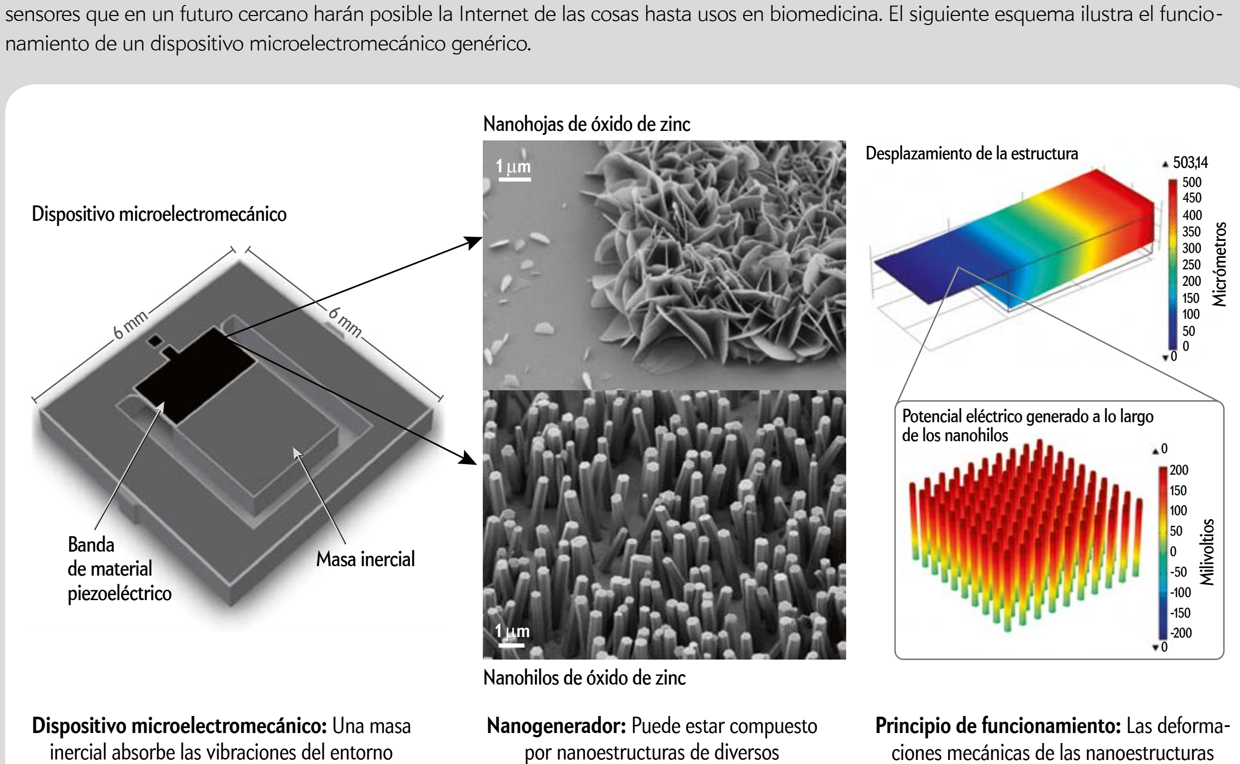
Nanoestructuras exóticas

Al mismo tiempo, varios trabajos recientes han estudiado la síntesis de nanoestructuras piezoeléctricas más exóticas que los nanohilos. Entre ellas destacan las nanohojas: placas con dimensiones lineales de micrómetros y con un espesor de pocas decenas de nanómetros. Una de sus ventajas reside en que, al ser tan delgadas, cualquier fuerza puede doblarlas y generar un piezopotencial.

El año pasado, junto con Isaac Rodríguez-Ruiz y Jaume Esteve, del Instituto de Microelectrónica de Barcelona, propusimos una nueva técnica para hacer crecer nanohojas en una capa semilla de nitruro

NANODISPOSITIVOS AUTOALIMENTADOS

Los materiales piezoeléctricos permiten convertir deformaciones mecánicas en electricidad. En la última década, numerosos grupos de investigación han intentado aprovechar este principio físico para fabricar nanogeneradores: diminutos mecanismos capaces de absorber la energía mecánica del entorno para activar micro- y nanodispositivos de todo tipo. Sus posibles aplicaciones van desde la alimentación de los sensores que en un futuro cercano harán posible la Internet de las cosas hasta usos en biomedicina. El siguiente esquema ilustra el funcionamiento de un dispositivo microelectromecánico genérico.



Dispositivo microelectromecánico: Una masa inercial absorbe las vibraciones del entorno y transmite esa energía mecánica a una banda de nanoestructuras piezoeléctricas.

Nanogenerador: Puede estar compuesto por nanoestructuras de diversos tipos, como nanohojas (*arriba*) o nanohilos (*abajo*).

Principio de funcionamiento: Las deformaciones mecánicas de las nanoestructuras (*arriba*) generan un potencial eléctrico a su través (*abajo*).

GONZALO MURILLO/CENTRO NACIONAL DE MICROELECTRÓNICA/SEM AURIGA (*nanoestructuras, fotografías de microscopía electrónica de barrido*)/COMSOL MULTIPHYSICS (*simulación del principio de funcionamiento*)

de aluminio (AlN). Aunque la solución nutriente y las condiciones de temperatura son idénticas a las usadas en el caso de los nanohilos, las estructuras formadas exhiben una geometría completamente distinta. Ello parece deberse a que la capa semilla empleada crea un pequeño gradiente de *p*H localizado como consecuencia de la hidrólisis del AlN, lo que favorece el crecimiento de estructuras en un plano, en lugar de en un eje.

Nuestros resultados, publicados en *Crystal Growth and Design*, demostraron que las nanohojas que crecen de esta manera lo hacen mucho más rápido que los nanohilos, así como de forma más homogénea, uniforme y reproducible. Además, la capa semilla de AlN permite controlar con una precisión micrométrica el lugar de crecimiento de las nanohojas e integrarlas en obleas de silicio, lo que augura una perfecta adaptación con la microelectrónica actual.

Por último, otra línea de investigación estudia la combinación de nanoestructuras piezoeléctricas con polímeros. Entre otras posibilidades, la combinación de nanohilos de ZnO y polifluoruro de vinilideno (PVDF) reviste especial interés debido a la naturaleza piezoeléctrica de ambos materiales. En un trabajo publicado este año en *Nano Energy*, hemos demostrado que los nanohilos de ZnO ejercen un estrés mecánico interno en el PVDF, lo que incrementa de manera considerable la potencia del nanogenerador híbrido. De hecho, una de las ventajas de los nanohilos es que pueden soportar tensiones mecánicas muy elevadas sin fracturarse y, por tanto, transmitir con eficiencia ese estrés mecánico al resto de la estructura. Como consecuencia, no solo gracias a la naturaleza piezoeléctrica del ZnO, sino también gracias a sus propiedades nanomecánicas, este tipo de estructuras resultan de gran utilidad tanto en aplicaciones de generación de energía como en sensores de fuerzas.

De la vestimenta al interior del cuerpo

En un futuro cercano, los nanogeneradores posibilitarán un amplio abanico de aplicaciones de todo tipo. En primer lugar, su uso podría dar lugar a la creación de fibras y prendas capaces de generar electricidad a partir de los movimientos del cuerpo humano. A la vista de su fácil integración con la tecnología de silicio, nuestro grupo del Instituto de Microelectrónica de Barcelona está participando actualmente en varios proyectos nacionales y europeos para desarrollar dispositivos electrónicos autónomos capaces de alimentarse a partir de las fuentes residuales de energía mecánica que los rodean.

Con todo, las posibilidades de estos dispositivos van mucho más allá. Un ejemplo es el uso de nanohojas en aplicaciones biológicas, donde la fuerza ejercida por una célula viva puede aprovecharse para activar estas nanoestructuras y generar un piezopotencial que, a su vez, estimula la propia célula.

Una colaboración reciente entre nuestro grupo e investigadores del Departamento de Biologia Celular, Fisiología e Inmunología de la Universidad Autónoma de Barcelona ha demostrado por primera vez este principio de estimulación celular. Los resultados, publicados el pasado mes de abril en *Advanced Materials*, abren la puerta a la creación de nanogeneradores que viajen por el interior del cuerpo con el objetivo de tratar enfermedades mediante una estimulación eléctrica adecuada en líneas celulares concretas.

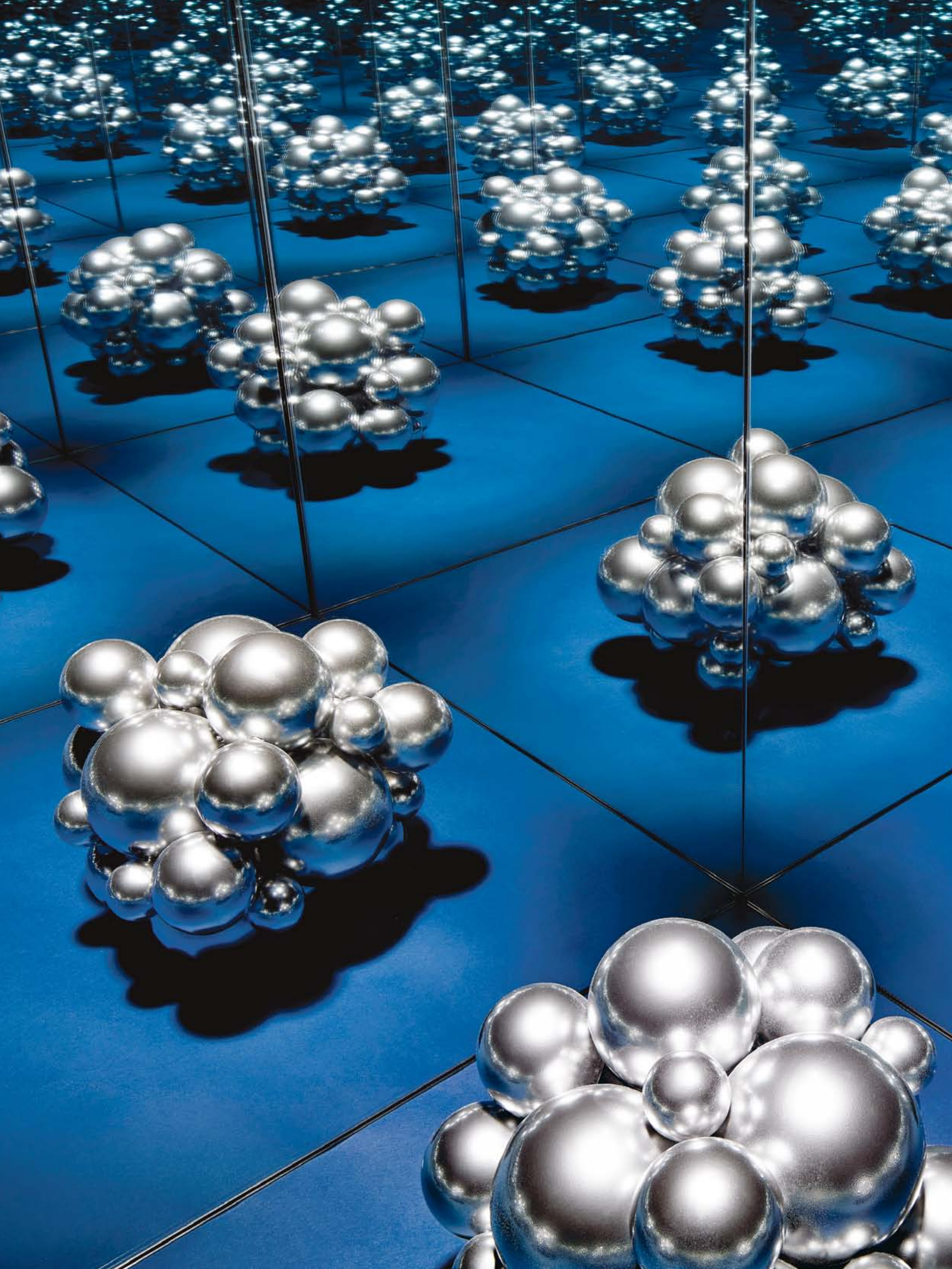
—Gonzalo Murillo
Instituto de Microelectrónica de Barcelona
Centro Nacional de Microelectrónica (CSIC)

PARA SABER MÁS

Selective area growth of high quality ZnO nanosheets assisted by patternable AlN seed layer for wafer level integration. Gonzalo Murillo, Isaac Rodríguez-Ruiz y Jaume Esteve en *Crystal Growth & Design*, vol. 16, n.º 9, págs. 5059-5066, septiembre de 2016.
Improving morphological quality and uniformity of hydrothermally grown ZnO nanowires by surface activation of catalyst layer. Gonzalo Murillo et al. en *Nanoscale Research Letters*, vol. 12, art. n.º 51, enero de 2017.
Mechanical and electrical characterization of PVDF-ZnO hybrid structure for application to nanogenerator. Moonkang Choi et al. en *Nano Energy*, vol. 33, págs. 462-468, marzo de 2017.
Electromechanical nanogenerator–cell interaction modulates cell activity. Gonzalo Murillo et al. en *Advanced Materials*, publicación adelantada en línea el 24 de abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanotecnia autoalimentada. Zhong Lin Wang en *IyC*, junio de 2008.





EL MULTIVERSO CUÁNTICO

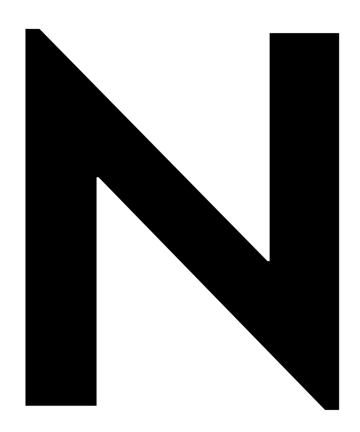
COSMOLOGÍA

Una sorprendente conexión entre la cosmología y la mecánica cuántica podría revelar los secretos del espacio y el tiempo

Yasunori Nomura



Yasunori Nomura es director del Centro Berkeley de Física Teórica de la Universidad de California en Berkeley. Es también miembro del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley e investigador principal del Instituto Kavli de Física y Matemáticas del Universo, en la Universidad de Tokio.



UMEROSOS COSMÓLOGOS ACEPTAN YA LA EXTRAORDINARIA IDEA DE QUE LO QUE se nos muestra como todo el universo podría no ser más que una minúscula parte de una estructura mucho mayor: el multiverso. Según esta imagen existen muchos universos, en cada uno de los cuales las reglas que hasta ahora hemos llamado leyes fundamentales de la naturaleza toman diferentes formas. Por ejemplo, los tipos de partículas elementales y sus propiedades pueden variar de un universo a otro.

La idea del multiverso tiene su origen en la teoría que afirma que el universo primitivo se expandió de manera exponencial. En ese proceso, conocido como «inflación», algunas regiones pudieron haber detenido su rápida expansión antes que otras. De esta manera se habrían formado multitud de «universos burbuja», así llamados por analogía con el agua hirviendo. Nuestro universo podría ser tan solo una de esas burbujas, la cual coexistiría con infinitas otras.

La idea de que nuestro universo sea parte de una estructura mucho mayor no resulta, en sí misma, tan descabellada como pudiera parecer. A lo largo de la historia, los científicos han aprendido en repetidas ocasiones que lo que vemos no es ni mucho menos todo lo que hay. Aun así, la idea del multiverso, con su ilimitado número de universos burbuja, presenta un grave problema teórico: parece acabar con la posibilidad de realizar predicciones, un requisito clave de cualquier teoría física útil. En palabras de Alan Guth, físico del Instituto de Tecnología de Massachusetts y uno de los creadores de la teoría de la inflación cósmica, «en un universo eternamente sometido a inflación, cualquier cosa que pueda ocurrir acabará ocurriendo; de hecho, ocurrirá un número infinito de veces».

En un único universo, en el que cada suceso solo acontece un número limitado de ocasiones, resulta posible conocer la probabilidad relativa de un evento frente a otro: basta con comparar el número de veces que tiene lugar cada uno. Pero, en un multiverso en el que cualquier cosa ocurre infinitas veces, ese cálculo se torna imposible, por lo que ningún suceso será más probable que otro. Podemos predecir lo que queramos, ya que antes o después siempre ocurrirá en algún universo. Por desgracia, esto no nos dice nada sobre nuestro universo particular.

Esta aparente pérdida de predictibilidad ha preocupado a los físicos durante largo tiempo. Sin embargo, algunos investigadores nos hemos percatado de que la teoría cuántica (que, a diferencia de la cosmología, se ocupa del mundo microscópico) podría tener la clave de la solución. En concreto, la imagen de un multiverso en eterna inflación tal vez sea equivalente, desde un punto de vista matemático, a la interpretación de los «muchos mundos» de la mecánica cuántica, una idea propuesta hace sesenta años. Como veremos, esta conexión entre teorías no solo resuelve el problema de la predictibilidad, sino que podría revelar también aspectos sorprendentes del espacio y el tiempo.

LOS MUCHOS MUNDOS CUÁNTICOS

La idea de una correspondencia entre el multiverso y la mecánica cuántica se me ocurrió al revisar los fundamentos de la interpretación de los muchos mundos. Esta idea surgió como un intento de dar sentido a algunos de los aspectos más extraños de la mecánica cuántica. En el mundo cuántico, causa y efecto no funcionan igual que en el mundo macroscópico, ya que el resultado de cualquier proceso es siempre probabilístico.

Según nuestra experiencia macroscópica, cuando lanzamos una pelota siempre podemos predecir dónde caerá si sabemos el lugar de lanzamiento, su velocidad y otros factores. Pero si esa pelota fuera una partícula cuántica, lo único que podríamos calcular es la probabilidad de que caiga en un lugar u otro. Este carácter probabilístico no puede sortearse obteniendo más información sobre la pelota, las corrientes de aire o cualquier otro detalle: constituye una propiedad intrínseca del mundo cuántico. La misma pelota lanzada en las mismas condiciones caerá unas veces en el punto A y otras en B. Esto puede parecer extraño, pero las leyes cuánticas han sido confirmadas en innumerables experimentos y sabemos que describen con gran fidelidad el funcionamiento de la naturaleza a la escala de las partículas y las fuerzas subatómicas.

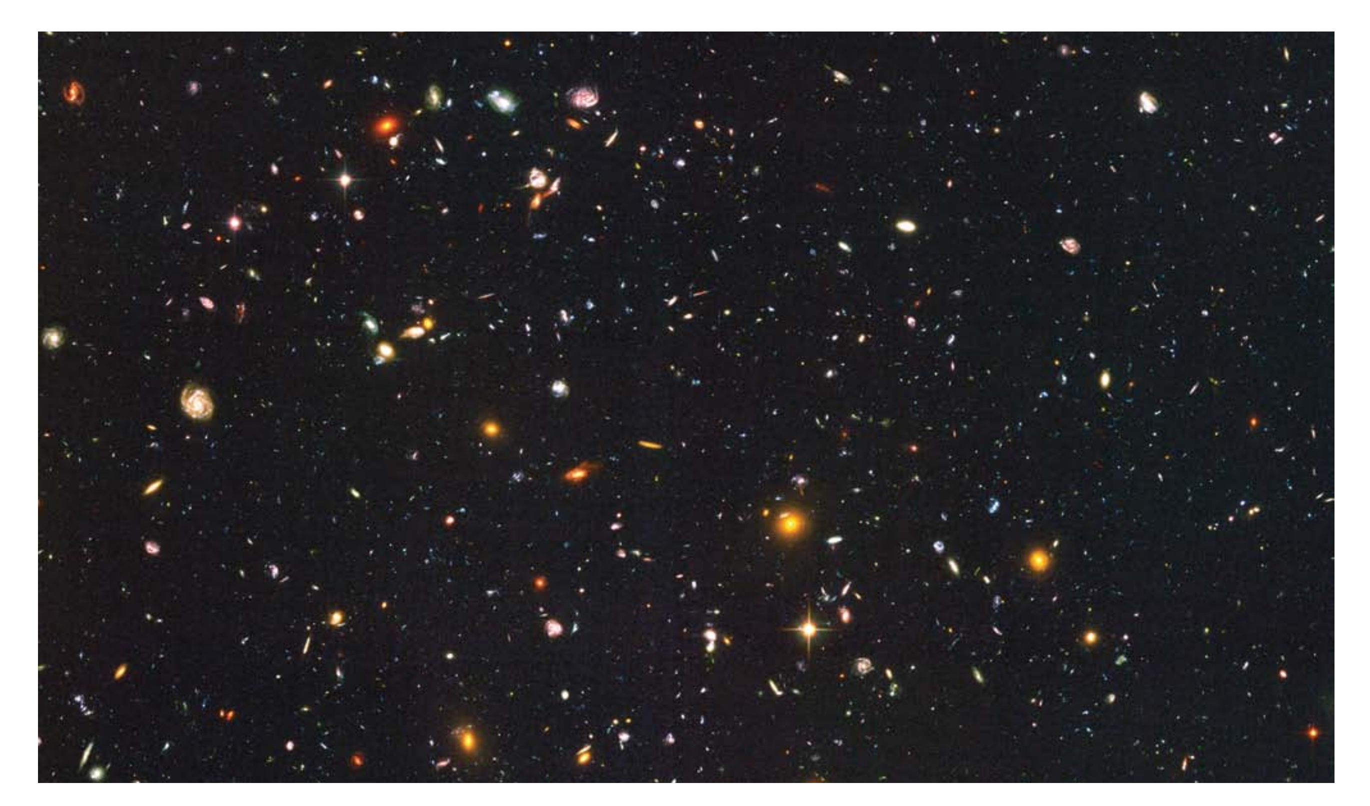
EN SÍNTESIS

La teoría de la inflación cósmica, según la cual el universo primitivo se expandió exponencialmente, sugiere que nuestro universo forma parte de un vasto multiverso.

En un multiverso, sin embargo, cualquier acontecimiento que pueda ocurrir sucederá un número infinito de veces. Eso destruye el poder predictivo de la teoría.

Una posible solución sugiere considerar el multiverso inflacionario como equivalente a los «muchos mundos» de la interpretación de Everett de la mecánica cuántica. Dicha propuesta considera que tales universos coexisten en un «espacio de probabilidades», más que en un único espacio real.

PÁGINAS ANTERIORES: THE VOORHES



ESTA IMAGEN del telescopio Hubble muestra algunas de las galaxias más lejanas que es posible observar. Otros objetos más distantes permanecerán para siempre fuera de nuestro alcance, ya que la expansión del universo los hace alejarse a velocidades mayores que la de la luz. Este «horizonte cosmológico» encierra importantes implicaciones para la teoría del multiverso.

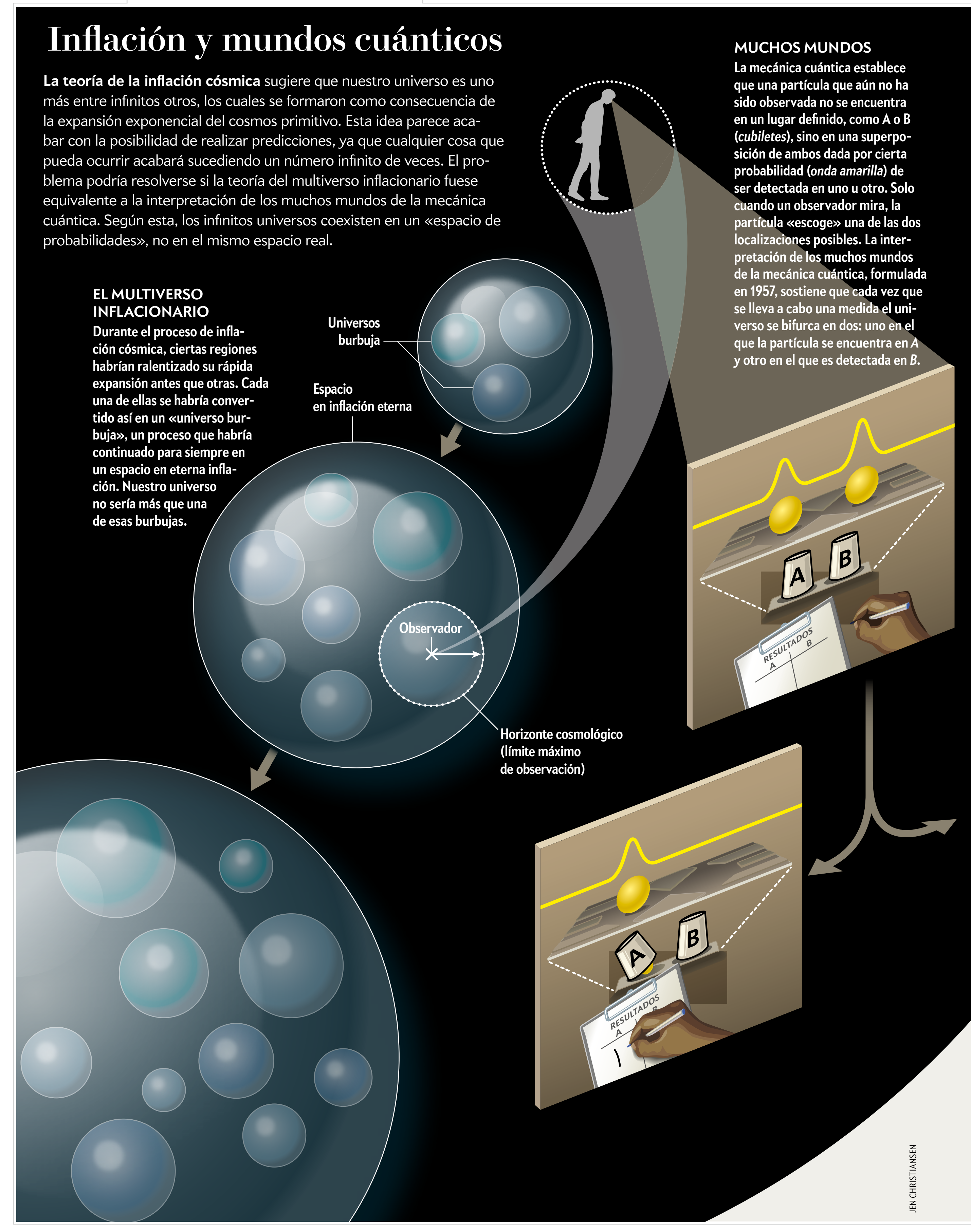
En el mundo cuántico, después de lanzar la pelota, pero antes de mirar dónde cayó, decimos que el sistema se encuentra en un estado de superposición de los resultados *A* y *B*. Eso quiere decir que la pelota no se encuentra ni en *A* ni en *B*, sino en una combinación borrosa de ambos puntos (así como de muchos otros). Sin embargo, una vez que efectuamos una observación y comprobamos que la pelota ha caído en cierto lugar, cualquier otra persona que la examine estará de acuerdo con nosotros en el resultado. Antes de realizar una medida sobre un sistema cuántico, el resultado es incierto; pero, después, toda observación concordará con la primera.

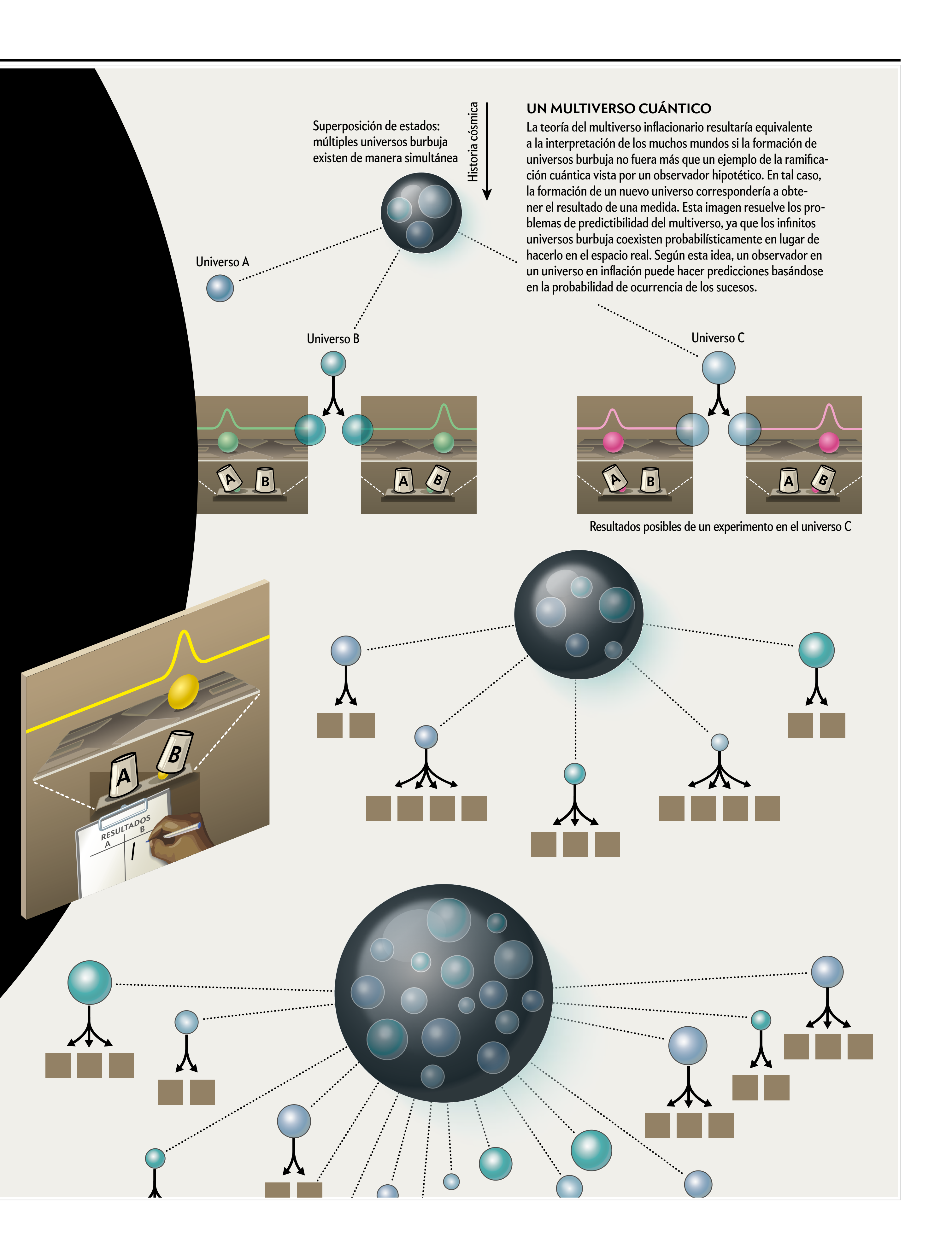
En la forma tradicional de entender la mecánica cuántica, conocida como interpretación de Copenhague, este cambio se explica diciendo que la primera medición transforma el estado del sistema, el cual pasa de una superposición a un estado bien definido. No obstante, aunque la interpretación de Copenhague se muestra compatible con los resultados de los experimentos, conduce también a serias dificultades conceptuales. ¿Qué significa realmente medir? ¿Y por qué cuando lo hacemos el estado se convierte en uno bien definido? ¿Se produce también ese cambio cuando el observador es un perro o una mosca? ¿Qué ocurre cuando una molécula del aire interacciona con el sistema, algo que esperamos que suceda continuamente y que, sin embargo, no tratamos como si fuese una medida que puede interferir con el resultado? ¿O hay algún significado físico especial en el hecho de que un humano aprenda de manera consciente cuál es el estado de un sistema?

En 1957, Hugh Everett, por entonces estudiante de doctorado en la Universidad de Princeton, desarrolló la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica, la cual responde de forma satisfactoria a estas cuestiones. A pesar de ello, en su momento fue recibida con burlas y hoy sigue siendo menos popular que la interpretación de Copenhague. La idea fundamental de Everett era que el estado de un sistema cuántico refleja el de *todo* el universo a su alrededor, por lo que una descripción completa de la medida debe incluir también al observador. No podemos considerar el viento, la pelota y la mano que la lanza de manera aislada. Hemos de incluir también a la persona que examina dónde cae el objeto y todo lo que haya en el cosmos en ese instante.

En la interpretación de Everett, el estado del sistema después de la medida sigue siendo una superposición. Sin embargo, esta no se limita a los lugares en los que podía aterrizar la pelota, sino que incluye dos mundos completos. En uno de ellos, el observador constata que el estado del sistema ha cambiado al estado *A* y, por tanto, toda observación posterior ofrecerá el mismo resultado. Pero, en el momento en que esa medida tuvo lugar, un segundo universo se separó del primero. En este otro mundo, el observador detecta, y siempre detectará, que la pelota ha caído en *B*. Esto explica por qué el observador cree que su medida ha cambiado el estado del sistema. Lo que ha ocurrido es que, al llevar a cabo la medición (al interaccionar con el sistema), el observador mismo se ha dividido en dos personas que viven en sendos mundos paralelos: los correspondientes a los dos resultados posibles, *A* y *B*.

En esta imagen, que sea un humano quien realice la medida no reviste especial importancia. El estado de todo el universo se ramifica continuamente en multitud de mundos paralelos que coexisten en superposición. El observador humano, siendo parte de la naturaleza, no puede escapar a este proceso: seguirá dividiéndose en múltiples observadores que viven en otros tantos mundos posibles, todos los cuales son igualmente «reales».


Inflación y mundos cuánticos
La teoría de la inflación cósmica sugiere que nuestro universo es uno más entre infinitos otros, los cuales se formaron como consecuencia de la expansión exponencial del cosmos primitivo. Esta idea parece acabar con la posibilidad de realizar predicciones, ya que cualquier cosa que pueda ocurrir acabará sucediendo un número infinito de veces. El problema podría resolverse si la teoría del multiverso inflacionario fuese equivalente a la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica. Según esta, los infinitos universos coexisten en un «espacio de probabilidades», no en el mismo espacio real.
EL MULTIVERSO INFLACIONARIO
Durante el proceso de inflación cósmica, ciertas regiones habrían ralentizado su rápida expansión antes que otras. Cada una de ellas se habría convertido así en un «universo burbuja», un proceso que habría continuado para siempre en un espacio en eterna inflación. Nuestro universo no sería más que una de esas burbujas.
Universos burbuja
Espacio en inflación eterna
Observador
Horizonte cosmológico (límite máximo de observación)
MUCHOS MUNDOS
La mecánica cuántica establece que una partícula que aún no ha sido observada no se encuentra en un lugar definido, como A o B (cubiletes), sino en una superposición de ambos dada por cierta probabilidad (onda amarilla) de ser detectada en uno u otro. Solo cuando un observador mira, la partícula «escoge» una de las dos localizaciones posibles. La interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica, formulada en 1957, sostiene que cada vez que se lleva a cabo una medida el universo se bifurca en dos: uno en el que la partícula se encuentra en A y otro en el que es detectada en B.
A
B
RESULTADOS
A
B
A
B
RESULTADOS
A
B
JEN CHRISTIANSEN


UN MULTIVERSO CUÁNTICO
La teoría del multiverso inflacionario resultaría equivalente a la interpretación de los muchos mundos si la formación de universos burbuja no fuera más que un ejemplo de la ramificación cuántica vista por un observador hipotético. En tal caso, la formación de un nuevo universo correspondería a obtener el resultado de una medida. Esta imagen resuelve los problemas de predictibilidad del multiverso, ya que los infinitos universos burbuja coexisten probabilísticamente en lugar de hacerlo en el espacio real. Según esta idea, un observador en un universo en inflación puede hacer predicciones basándose en la probabilidad de ocurrencia de los sucesos.
Superposición de estados: múltiples universos burbuja existen de manera simultánea
Historia cósmica
Universo A
Universo B
Universo C
Resultados posibles de un experimento en el universo C
RESULTADOS
A
B

Una implicación obvia, aunque importante, es que todo lo que hay en la naturaleza, grande o pequeño, obedece las leyes de la mecánica cuántica.

¿Qué relación guarda esta interpretación de la mecánica cuántica con el multiverso del que hablábamos más arriba, en el que los universos paralelos parecen existir en un espacio continuo y real, y no como realidades paralelas? En 2011, argumenté que un multiverso en inflación eterna y los muchos mundos cuánticos de Everett son equivalentes en un sentido preciso. Según esta forma de entender el multiverso, el espacio infinito asociado con la inflación eterna es una especie de «ilusión». Los múltiples universos burbuja producidos por la inflación no existen en un único espacio real, sino que representan las diferentes ramas del árbol probabilístico. Hacia el mismo tiempo en que propuse esta idea, Raphael Bousso, de la Universidad de California en Berkeley, y Leonard Susskind, de Stanford, postularon algo similar. Si la interpretación del multiverso en términos de los muchos mundos de Everett es correcta, eso implicaría que la mecánica cuántica no opera solo a nivel microscópico, sino que desempeña un papel clave en la estructura global del multiverso, incluso a las mayores escalas.

El multiverso cuántico no da una respuesta inmediata a la pregunta de qué es el tiempo, pero sí proporciona un marco teórico desde el que abordarla

EL DILEMA DEL AGUJERO NEGRO

Para ver por qué la interpretación de los muchos mundos puede describir el multiverso inflacionario, hemos de hacer primero una breve excursión por la física de los agujeros negros. Estos objetos corresponden a regiones del espaciotiempo extremadamente curvadas, cuya gravedad es tan intensa que nada de lo que cae en ellos puede escapar. En este contexto, es posible concebir un experimento mental que nos muestra dónde falla la manera tradicional de pensar sobre el multiverso y por qué esta nos impide realizar predicciones.

Supongamos que dejamos caer un libro en un agujero negro y observamos desde fuera qué ocurre. Aunque el libro nunca podrá escapar, la teoría nos dice que la información contenida en él no se perderá. Una vez que el texto haya sido destruido por la gravedad del agujero negro, y después de que el agujero negro se haya «evaporado» poco a poco emitiendo una tenue radiación conocida como radiación de Hawking, el observador externo podrá reconstruir la información contenida en el libro examinando con cuidado dicha radiación. De hecho, esta información empieza a filtrarse gradualmente con la radiación de Hawking antes incluso de que el agujero negro se haya evaporado por completo.

Pero ¿cómo describiría el mismo proceso alguien que cayese en el agujero negro junto con el libro? En este caso, el libro simplemente cruza la frontera del agujero negro y permanece dentro. Por tanto, según un observador en el interior, la información contenida en el libro se queda allí para siempre. El problema es que, tal y como hemos argumentado más arriba, para un observador lejano la información escapa al exterior. ¿Qué punto de vista es el correcto? Podríamos pensar que tal vez la información se duplica: una copia permanece en el interior y la otra se emite al exterior. Sin embargo, esto es imposible: un resultado de las leyes cuánticas, el «teorema de la no clonación», prohíbe duplicar información de una manera fiel y completa. Parece, pues, que ambos puntos de vista no pueden ser ciertos a la vez.

Al respecto, Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, Susskind y otros físicos han propuesto la siguiente solución: ambas imágenes son correctas, pero no al mismo tiempo. Según el observador lejano, la información se halla en el exterior del agujero negro. No necesitamos describir qué ocurre en el interior, ya que dicha región es inaccesible incluso en principio. De hecho, para evitar la clonación de la información, resulta obligado considerar el interior como inexistente.

En cambio, para el observador que cae en el agujero negro, el interior es lo único hay y en él se encuentran el libro y toda su información. Pero esta imagen solo es posible si obviamos la radiación de Hawking emitida por el objeto. Esto resulta factible, porque el observador ha cruzado la frontera y se halla atrapado en el interior, aislado por tanto de la radiación. No existe ninguna incoherencia entre estas dos imágenes: la aparente contradicción que conduce a la clonación de la información solo surge si, de forma artificial, «pegamos» ambas representaciones del fenómeno. Pero esto es físicamente imposible, ya que nadie puede ser un observador externo e interno a la vez.

HORIZONTES COSMOLÓGICOS

El problema de la información en los agujeros negros puede parecer desconectado de la cuestión original: la relación entre el multiverso y los muchos mundos de la mecánica cuántica. Sin embargo, la superficie de un agujero negro guarda importantes semejanzas con el llamado «horizonte cosmológico»: la frontera que limita la región del universo desde la cual aún podemos recibir señales del espacio profundo. Este horizonte existe porque el universo se expande, y todo lo que hay más allá de esa frontera se aleja de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz, de modo que ningún mensaje enviado desde allí podrá alcanzarnos jamás. La situación es, por tanto, similar a la de un agujero negro visto por un observador lejano.

Al igual que con el agujero negro, la mecánica cuántica nos obliga a considerar como inexistente el espaciotiempo al otro lado del horizonte cosmológico. Si tuviésemos en cuenta tanto la zona exterior como la información que podremos extraer del horizonte en tiempos posteriores (el análogo de la radiación de Hawking del agujero negro), estaríamos contando dos veces la misma información. Por eso, toda descripción del estado cuántico del universo solo debería incluir la zona interior al horizonte cosmológico (junto con el horizonte en sí). En concreto, no podemos considerar un espacio infinito en una descripción única y consistente del cosmos.

Si el estado cuántico solamente refleja la región de dentro del horizonte, ¿dónde está el multiverso que pensábamos que

existía en un espacio infinito en inflación eterna? La respuesta es que la creación de universos burbuja es probabilística, como cualquier otro proceso cuántico. De la misma manera que una medida puede dar lugar a distintos resultados, cada uno caracterizado por una probabilidad, la inflación puede producir muchos universos, cada uno con una probabilidad de ser generado. En otras palabras: el estado cuántico asociado a un espacio en inflación eterna es una superposición de mundos (o ramas) que representan diferentes universos, cada uno de los cuales solo incluye la región interior a su propio horizonte.

Dado que cada uno de estos universos es finito, ahora podemos evadir el problema de predictibilidad que aparecía al considerar un espacio infinito y capaz de albergar todos los resultados posibles. En nuestro caso, los múltiples universos no existen simultáneamente en el espacio real: tan solo coexisten en el «espacio de probabilidades»; esto es, como posibles resultados de observaciones efectuadas por personas que viven en cada mundo. Por tanto, cada uno de estos universos (cada posible resultado) tiene una probabilidad específica de cobrar existencia.

Esta imagen unifica el multiverso de la inflación eterna y los muchos mundos de Everett. La historia cósmica se desarrolla como sigue: el multiverso comienza en algún estado inicial y evoluciona hasta convertirse en una superposición de múltiples universos burbuja. Con el tiempo, el estado correspondiente a cada una de esas burbujas se ramifica a su vez en más superposiciones de estados, los cuales representan posibles resultados de «experimentos» llevados a cabo dentro de cada universo (estos no tienen que ser experimentos científicos, puede tratarse de cualquier proceso físico). Al final, el estado que representa el multiverso en su conjunto contendrá un número enorme de ramas, cada una de las cuales corresponderá a uno de los posibles mundos que pueden surgir a partir de ese estado inicial. De esta manera, las probabilidades cuánticas determinan los resultados tanto en cosmología como en los procesos microscópicos. El multiverso y la interpretación de los muchos mundos son, de hecho, lo mismo: los dos se refieren a un mismo fenómeno, la superposición, que opera en escalas muy diferentes.

En esta nueva imagen, nuestro mundo no es más que uno de los posibles universos permitidos por los principios de la física cuántica, los cuales existen simultáneamente en el espacio de probabilidades.

UNA NUEVA IMAGEN DEL TIEMPO

¿Podemos verificar empíricamente estas ideas? Existe un fenómeno concreto cuyo descubrimiento apoyaría esta nueva forma de pensar: el multiverso podría generar una pequeña cantidad de curvatura negativa en nuestro universo. En otras palabras, aun en ausencia de gravedad, los cuerpos no viajarían en el espacio siguiendo líneas rectas, como ocurre en un universo plano, sino curvas (un ejemplo de superficie de curvatura negativa es una silla de montar; una esfera, en cambio, presenta curvatura positiva). Esta curvatura aparece porque, aunque los universos burbuja son finitos desde la perspectiva del multiverso en su conjunto, los observadores del interior de cada burbuja percibirían su propio universo como si fuese infinitamente grande, lo que haría que el espacio pareciese tener curvatura negativa.

Hasta ahora, todas las observaciones indican que nuestro cosmos es plano. No obstante, es posible que en las próximas décadas los experimentos que estudian cómo se curva la luz al viajar por el espacio consigan mejorar sus mediciones en dos órdenes de magnitud. Cualquier indicio de curvatura negativa ampararía la idea del multiverso, ya que, aunque no es imposible que dicha curvatura aparezca en un universo aislado, algo así resulta muy poco plausible. En concreto, eso apoyaría la imagen del multiverso que hemos descrito aquí, ya que esta teoría conduce de manera natural a una cantidad de curvatura negativa lo suficientemente grande para detectarla. Por el contrario, los modelos tradicionales de inflación cósmica tienden a producir una cantidad de curvatura negativa muchos órdenes de magnitud por debajo de lo que esperamos ser capaces de medir.

Por otro lado, el descubrimiento de que el universo presenta curvatura positiva refutaría la imagen del multiverso expuesta aquí, ya que la teoría de la inflación cósmica sugiere que los universos burbuja solo pueden generar curvatura negativa. Y, con suerte, podríamos incluso ver impactantes señales de la existencia del multiverso en forma de signos celestes de una «colisión» entre universos burbuja que se formaron en una misma rama del multiverso cuántico. Por supuesto, hoy no estamos en absoluto seguros de que sea posible detectar tales señales.

Hoy somos varios los investigadores que seguimos investigando la idea del multiverso cuántico desde un punto de vista teórico. Al respecto surgen varias preguntas. ¿Cómo podríamos determinar el estado cuántico de todo el multiverso? ¿Qué es el tiempo, y cómo emerge? El multiverso cuántico no nos da una respuesta inmediata a tales cuestiones, pero sí nos proporciona un marco desde el que abordarlas. Hace poco, he encontrado que imponer el requisito matemático de que la teoría tenga probabilidades rigurosamente definidas tal vez permita determinar el estado cuántico del multiverso. Las mismas condiciones parecen sugerir también que el estado cuántico global permanece constante, por más que un observador (que también se incluye en el estado del multiverso) vea nuevas burbujas formándose sin cesar. Esto implica que nuestra arraigada noción de un universo que cambia con el tiempo —y, de hecho, el concepto mismo de tiempo— puede que no sea más que una ilusión. El tiempo no sería más que algo que emerge a partir de una realidad más fundamental y que solo parece existir en las ramas locales del multiverso.

Buena parte de las ideas que he examinado aquí son aún muy especulativas, pero el solo hecho de poder abordar preguntas tan elevadas y profundas basándonos en avances teóricos ya es emocionante. No sabemos a dónde nos conducirán estas investigaciones. Parece claro, sin embargo, que estamos viviendo una época en la que nuestras exploraciones científicas nos están llevando más allá de lo que pensábamos que era el mundo físico (nuestro universo) hacia un dominio potencialmente carente de límites.

PARA SABER MÁS

Physical theories, eternal inflation, and the quantum universe. Yasunori Nomura en *Journal of High Energy Physics*, vol. 11, art. 063, noviembre de 2011.
Multiverse interpretation of quantum mechanics. Raphael Bousso y Leonard Susskind en *Physical Review D*, vol. 85, art. 045007, febrero de 2012.
What can the observation of nonzero curvature tell us? Alan H. Guth y Yasunori Nomura en *Physical Review D*, vol. 86, art. 023534, julio de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Universos paralelos. Max Tegmark en *IyC*, julio de 2003.
Los muchos mundos de Hugh Everett. Peter Byrne en *IyC*, febrero de 2008.
¿Existe el multiverso? George F. R. Ellis en *IyC*, octubre de 2011.



BIOLOGÍA MARINA

LA CONDUCTA ANIMAL EN UN MAR CADA VEZ MÁS ÁCIDO



PASCAL CAMPION

La acidificación del océano puede alterar el comportamiento de las especies marinas y poner en peligro su supervivencia

Danielle L. Dixson

Los peces payaso pasan toda su vida adulta en los arrecifes coralinos, bajo la protección de los tentáculos de una anémona de mar. Sin embargo, antes de convertirse en adultos, deben superar un peligroso viaje que se inicia nada más nacer. Esa diminuta e incompleta versión del pez adulto que es la larva se aleja del arrecife para completar su desarrollo en mar abierto, lejos de los depredadores. Tras un período de desarrollo de entre 11 y 14 días, el juvenil está listo para nadar de regreso al arrecife y asentarse en la anémona, que a partir de entonces se convertirá en su hogar. Pero para aproximarse deberá atravesar un «muro de bocas», el que conforman la gran diversidad de animales, como lábridos y peces león, que patrullan el arrecife, listos para engullir a cualquier pececillo. Muchos logran superarla ayudados por su olfato, gracias al cual detectan a los depredadores y logran mantenerse fuera de su alcance.

En realidad, el sentido del olfato se basa en un mecanismo puramente químico, pues detecta e identifica moléculas disueltas en el agua y desencadena respuestas a ellas. Incluso la más pequeña modificación de la composición del agua podría inutilizar este delicado mecanismo de supervivencia. Los científicos empiezan a preguntarse por las consecuencias de la acidificación del agua marina, un fenómeno global provocado por la absorción de dióxido de carbono de la atmósfera. En 2010, junto con mis colaboradores, coloqué 300 larvas de pez payaso recién eclosionadas en un tanque de agua marina de nuestro laboratorio y las supervisamos durante 11 días. Al verter el olor de un pez inofensivo, las larvas no mostraron ninguna respuesta. Pero ante el olor a mero, unos de sus depredadores, huyeron en todas direcciones.

A continuación repetimos el experimento con otras 300 larvas de los mismos progenitores, pero esta vez en un medio más ácido, el que podría darse en ciertas regiones del océano hacia 2100 de continuar la tendencia actual. Las larvas se desarrollaron normalmente, pero ninguna de ellas reaccionó ante el olor del depredador. En realidad, se desplazaron con preferencia hacia el peligroso olor, en lugar de dirigirse hacia el agua inodora. Al añadir simultáneamente el olor de un depredador y el de un pez no peligroso, los pececillos parecían no aclararse, pues pasaban tanto tiempo en una zona como en la otra. Detectaban las señales químicas, pero no lograban descifrar su significado. Este cambio de comportamiento resultaba sorprendente y preocupante. Esperábamos que la acidificación modificara levemente la comunicación química, pero no que indujera a los peces a nadar directamente hacia una muerte inminente.

Todos los animales desempeñan las mismas funciones básicas durante la vida: buscan comida, se reproducen y evitan ser devorados en el intento. En los arrecifes coralinos, donde los depredadores y las presas viven en un hábitat complejo de reducido tamaño, existe una fuerte presión selectiva para evitar a los depredadores. Cualquier alteración de esta capacidad podría tener efectos catastróficos para el conjunto del ecosistema.

Si un agua cada vez más ácida modifica el sentido del olfato del pez payaso, también podría afectar a otros sentidos y comportamientos. Y si bien nosotros solo hemos estudiado una especie de pez payaso, el olfato

resulta esencial para una enorme diversidad de especies marinas. Como mínimo, la confusión y la desorientación provocada por la acidificación sería un factor de estrés adicional para especies que ya se hallan al límite debido al incremento de la temperatura, la sobrepesca y los cambios en la disponibilidad de alimento. Además, si el comportamiento de los animales marinos se trastoca, toda la red trófica, los patrones migratorios e incluso ecosistemas completos podrían desmoronarse. Aunque los datos aún son limitados, parecen claros: la acidificación del océano confunde a los peces.

Danielle L. Dixson es profesora de ciencia y política marinas en la Universidad de Delaware. Estudia el efecto del cambio climático y la degradación ambiental en el comportamiento de los organismos marinos.



EL PROBLEMA DE LA ACIDEZ

Desde la revolución industrial, el contenido en dióxido de carbono de la atmósfera ha pasado de 280 partes por millón (ppm) a algo más de 400 ppm en la actualidad. Este valor sería aún mayor de no ser por los océanos, responsables de la absorción del 30 o 40 por ciento del dióxido de carbono (CO_2) emitido a la atmósfera. Una mayor cantidad de CO_2 en el agua marina desencadena reacciones químicas que provocan su acidificación, expresada como una reducción del *p*H. Las aguas superficiales son hoy aproximadamente un 30 por ciento más ácidas que a finales del siglo xix y, si la tendencia actual en las emisiones continúa, a finales del siglo xxi podrían serlo un 150 por ciento más.

Esa mayor acidez provoca la disolución de la calcita y el aragonito, dos minerales esenciales para la construcción de las conchas y los exoesqueletos de ciertas criaturas marinas. Los moluscos, los erizos y el plancton cultivados por otros investigadores en depósitos con agua enriquecida en CO_2 desarrollaron conchas y exoesqueletos incompletos o deformes. A pesar de ello, los científicos creían que los peces y otros organismos carentes de exoesqueleto serían inmunes a la acidificación. Esa idea se basaba en experimentos realizados en los años ochenta que indicaban que ciertos animales ejercían un control extraordinario sobre las características químicas de su medio interno al aumentar o disminuir la cantidad de bicarbonato y cloruro en su organismo. Sin embargo, aquellos estudios solo examinaban la fisiología, es decir, si los animales podían o no sobrevivir en agua ácida. Pero comportarse con normalidad, buscar alimento y evitar el peligro requiere algo más. Nuestro grupo de investigación ha sido uno de los primeros en abordar la siguiente pregunta: ¿puede la acidificación cambiar el comportamiento?

CONFUSIÓN DE OLORES Y SONIDOS

Nuestros experimentos con peces payaso ofrecieron indicios sólidos de que la acidificación alteraba el comportamiento animal. Otros experimentos realizados desde entonces han proporcionado resultados igualmente preocupantes. Como la mayoría de los depredadores de los arrecifes coralinos se alimentan durante el día, los juveniles de pez payaso suelen regresar al arrecife durante la noche, preferentemente bajo la luz de la luna, cuando los atacantes se muestran pasivos o duermen. Pero orientarse a oscuras en el ambiente relativamente homogéneo del mar abierto no resulta sencillo para un pececillo con una longitud inferior a la de una moneda de 10 céntimos, por lo que recurre a los sonidos del arrecife y sus habitantes para guiarse. Un año después de nuestro experimento sobre el olfato, decidimos evaluar si la acidificación interfería también con el oído.

Para determinarlo, colocamos a los jóvenes peces payaso en el interior de una caja situada dentro de un tanque con agua marina. Cuando reproducíamos en un lado de la caja el sonido grabado en el arrecife durante las horas diurnas (lo que debería actuar como un repelente), los pececillos pasaban las tres cuartas partes del tiempo en el lado opuesto, lo más lejos posible del origen del ruido. Pero al repetir el experimento con pececillos criados en agua un 60 por ciento más ácida (valor esperado hacia 2030), estos no se mostraron tan asustadizos. En realidad, algo más de la mitad fueron atraídos por el sonido grabado durante el día.

Repetimos el experimento dos veces más, con agua un 100 y un 150 por ciento más ácida (valores esperados hacia 2050 y 2100, respectivamente). En ambos casos, los pececillos pasaron el 60 por ciento del tiempo cerca del altavoz que emitía el sonido diurno del arrecife (mediante una serie de pruebas confirmamos que no eran sordos). En condiciones de elevada acidificación, los peces payaso se mostraban incapaces de descifrar el significado de las señales sonoras.

Las especies marinas con órganos de los sentidos alterados tal vez pierdan la aptitud de huir de los depredadores. Pero también podría suceder lo contrario: quizá pierdan destreza para detectar las presas que les sirven de alimento.

Los tiburones poseen un sentido del olfato extraordinariamente agudo, del que dependen para orientarse, hallar pareja y perseguir a sus presas. Dada la confusión sensorial detectada en los peces payaso, nos preguntamos cómo responderían los tiburones a la acidificación del agua. Frente a Woods Hole, Massachusetts, capturamos 24 musolas pintadas, unos pequeños tiburones que frecuentan las aguas templadas entre las dos Carolinas y Nueva Inglaterra. Las dividimos en tres grupos que alojamos en sendos estanques circulares. Los tiburones del grupo 1 se limitaron a nadar en agua tomada directamente de las proximidades de Woods Hole; los del grupo 2 fueron expuestos a agua tratada para reproducir el nivel de acidez previsto para 2050; y los del grupo 3, en agua que reproducía el nivel de 2010. Simultáneamente, creamos una «esencia de calamar» dejando calamares en remojo y filtrando el agua a través de un paño; los tiburones adoran los calamares.

EN SÍNTESIS

La creciente acidificación del océano provocada por el cambio climático estaría alterando en los organismos marinos comportamientos importantes que necesitan para sobrevivir.

Los experimentos demuestran que las damiselas, los tiburones y los cangrejos ermitaños mantenidos en agua muy acidificada pierden la capacidad de detectar a sus depredadores y presas mediante el olfato, o se adentran de forma inesperada en lugares peligrosos.

No queda claro si los organismos marinos lograrán adaptarse a un cambio gradual del *p*H o si podrán transmitir a la descendencia los rasgos adaptativos. Los estudios realizados en arrecifes situados en zonas volcánicas, más ácidas de lo normal, podrían ofrecer respuestas a estos interrogantes.

Tras cinco días, permitimos a cada tiburón nadar en un tanque de pruebas alargado de diez metros de longitud por dos de anchura. La acidez del agua reproducía la del tanque donde había estado hasta entonces. El tanque de pruebas tenía dos orificios por los que se bombeaban sendas plumas de agua desde la cabecera hasta la cola. Una fluía a la izquierda del tiburón y la otra a su derecha. Una vez el animal empezaba a nadar, añadíamos un poco de «esencia de calamar» por una de las entradas. Si el tiburón mostraba preferencia por uno de los lados, invertíamos las plumas.

Las cámaras situadas sobre los tanques de pruebas, con el correspondiente *software*, registraban y analizaban lo que sucedía. Los tiburones del grupo 1, expuestos al agua normal, pasaban el 60 por ciento del tiempo nadando en la pluma con el olor del calamar. Lo mismo hicieron los del grupo 2. Pero los del grupo 3 evitaron activamente el olor de su presa, pues pasaron menos del 15 por ciento del tiempo en la pluma con olor a calamar. También observamos otras diferencias. Los tiburones del grupo 1 se abalanzaban y mordían de forma repetida un ladrillo situado frente al orificio por el que salía agua con olor a calamar. Lo hicieron dos veces más que los del grupo 2 y tres veces más que los del grupo 3.

Sorprende ver a un depredador perder el interés por su comida. Los peces coralinos evaluados en otros experimentos parecen mostrar un comportamiento igual de extraño. Dada la importancia de los tiburones como depredadores apicales en el ecosistema y su conocida sensibilidad a las variaciones ambientales, la acidificación del océano podría representar una seria amenaza para estos animales y los ecosistemas donde viven.

LA TEMERIDAD ES MALA

Siempre resulta arriesgado extrapolar a la naturaleza el comportamiento observado en cautividad. Por ello viajamos hasta una laguna arenosa próxima a una de las islas septentrionales de la Gran Barrera de Coral para evaluar otra característica: la temeridad. Allí medimos la respuesta de peces damisela jóvenes al olor de un depredador tras exponerlos a agua acidificada durante cuatro días. En el tanque de pruebas, cerca de la mitad de las damiselas expuestas a la acidez prevista para 2050 se sintieron atraídas por la pluma con el olor del depredador, mientras que la otra mitad no. Pero al reproducir la acidez estimada para 2100, todas ellas se sintieron atraídas.

Tras tatuar a las damiselas y así poder identificarlas, las liberamos en un pequeño arrecife que habíamos construido en la laguna. Los peces que habían sido sometidos a los mayores niveles de acidez se comportaron de forma arriesgada; en lugar de permanecer al resguardo del coral, se alejaban más y con mayor frecuencia que los expuestos al agua marina no acidificada. Y cuando fueron espantados por un buceador para que se refugiaran en el arrecife, lo hicieron pero lo abandonaron antes que el resto. Y, en lo que constituye la prueba definitiva, las damiselas expuestas a los niveles de 2100 experimentaron un riesgo de depredación nueve veces superior al de los peces de control. Las sometidas a los niveles de 2050 no se mostraron tan temerarias, pero aun así abandonaron el arrecife y sufrieron una mortalidad por depredación cinco veces superior.

A los investigadores nos gusta estudiar los peces de los arrecifes coralinos porque su comportamiento es previsible y fácil de observar. Pero los experimentos con otros animales marinos también han demostrado comportamientos anómalos. Científicos del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey han cultivado cangrejos ermitaños en condiciones de acidez. Los crustáceos no exhibieron la temeridad observada en las damiselas, pero tardaban más tiempo en volver a salir de sus conchas tras ser atacados por un pulpo de juguete que simulaba a un depredador.

En Chile, los experimentos se han realizado con la oreja de mar chilena, un molusco que vive adherido a las rocas en costas barridas por el oleaje. Normalmente, al ser arrancadas de sus asideros por las olas, las orejas de mar vuelven a sujetarse con rapidez, evitando así ser arrastradas por la corriente y ser atacadas por los depredadores. Al aumentar un 50 por ciento los niveles de CO_2, algunos ejemplares tardaron menos de lo normal en voltearse. Pero algunos de los expuestos al agua más ácida realizaron movimientos erróneos al tratar de evitar a los cangrejos que merodeaban por los alrededores y otros se dirigieron hacia las pinzas de los cangrejos en lugar de alejarse de ellas.

Parece evidente que la acidificación nubla la mente de las criaturas marinas. Pero ¿cómo lo hace? Ciertos investigadores se preguntan si las señales propiamente dichas, esto es, los sonidos y los olores, cambian con el *p*H. Sin embargo, el registro experimental indica que los animales identifican con rapidez las señales químicas en agua enriquecida en CO_2. Otros investigadores han propuesto que las anomalías en el comportamiento podrían representar respuestas de estrés propias de peces que están intentando regular la cambiante acidez de su cuerpo, aunque hacen falta más datos para confirmarlo.

Philip L. Munday, de la Universidad James Cook en Australia, y quien escribe intuimos otro motivo y decidimos colaborar con Göran E. Nilsson, de la Universidad de Oslo. Nilsson sospechaba que la acidificación interfería con un receptor de neurotransmisor, denominado $GABA_A$, responsable de modular las señales en el cerebro y el resto del sistema nervioso de muchos animales, incluidos los humanos. Entre otras tareas, el $GABA_A$ inhibe las señales nerviosas al facilitar el transporte de cloruro y bicarbonato a través de la membrana celular de las neuronas. Al ser expuestos a niveles elevados de CO_2, los peces expulsan cloruro de su organismo para acumular más bicarbonato, en un intento por minimizar el cambio de *p*H en su interior. Sin embargo, estos cambios químicos excitan a los receptores $GABA_A$, lo que debilita las señales nerviosas. Cuando los peces sometidos a elevados niveles de CO_2 se introducen en agua con gabacina, una substancia que reduce la excitación, recuperan su comportamiento normal en 30 minutos. De todos modos, la sensibilidad del $GABA_A$ difiere de una especie a otra, por lo que no queda clara que esta sea la causa última de los cambios de comportamiento.

¿PUEDEN ADAPTARSE LOS PECES?

La pregunta más habitual que se me plantea cuando hablo sobre la acidificación del océano es qué posibilidades existen

de que la fauna marina se adapte. La naturaleza tiene una sorprendente capacidad para sanarse a sí misma. Pero predecir cómo se adaptará un organismo resulta difícil, y prever el éxito de adaptación de ecosistemas complejos es prácticamente imposible.

Los datos experimentales han revelado algunos patrones comunes. Por ejemplo, el sentido del olfato se ve alterado tanto en tiburones adultos como en jóvenes peces payaso. Parece existir también un valor umbral a partir del cual los daños resultan generalizados en los peces coralinos: con el nivel de acidez esperado para 2050 la mitad presentan una conducta anómala, pero con el previsto para 2100 casi todos muestran ese comportamiento.

De todos modos, hemos de preguntarnos si la tasa de acidificación empleada en los experimentos introduce un factor de complejidad adicional. En la mayor parte de las pruebas, los animales han recibido valores elevados de CO_2 durante unos pocos días o meses, un plazo realmente breve. No se les ha dado una oportunidad para adaptarse o aclimatarse. Hemos de estudiar los cambios en su medio natural a medida que el océano se acidifica.

Para profundizar más, algunos investigadores han dirigido su mirada a los arrecifes coralinos situados junto a surgencias gaseosas fruto de la actividad volcánica; ahí, el CO_2 alcanza el arrecife a través del lecho marino y provoca niveles similares a los previstos para 2100. Al visitar los arrecifes volcánicos de Papúa Nueva Guinea, observamos cómo las damiselas jóvenes presentes en las zonas de surgencia se veían atraídas por el olor de los depredadores, no distinguían entre los depredadores y los que no lo eran y mostraban un comportamiento temerario, el mismo repertorio de anomalías desplegadas por nuestros peces de laboratorio. En los arrecifes sin surgencias, las damiselas detectaban y evitaban a los depredadores y eran menos temerarias.

La acidificación representa uno más de los diversos factores de estrés que sufren los animales marinos. La sobrepesca, el incremento de la temperatura, el aumento de la contaminación, la eliminación de depredadores apicales, como los tiburones, y la destrucción del hábitat están dañando a los océanos. Aunque las autoridades logren mitigar problemas locales, como el cercenamiento de las aletas de los tiburones, son los cambios globales, como el incremento de la temperatura y la acidificación, los que pueden finalmente doblegar a numerosas especies. Y al mismo tiempo que estudiamos el modo en que los factores de estrés afectan físicamente a la fauna marina, debemos considerar también cómo alteran sus capacidades cognitivas, tan necesarias para su supervivencia. IyC

PARA SABER MÁS

Behavioural impairment in reef fishes caused by ocean acidification at CO_2 seeps. Philip L. Munday et al. en *Nature Climate Change*, vol. 4, págs. 487-492, junio de 2014.
Odor tracking in sharks is reduced under future ocean acidification conditions. Danielle L. Dixson et al. en *Global Change Biology*, vol. 21, n.° 4, págs. 1454-1462, abril de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La acidificación de los océanos. Scott C. Doney en *IyC*, mayo de 2006.
La vida oceánica, amenazada. Marah J. Hardt y Carl Safina en *IyC*, diciembre de 2010.

ASTROFÍSICA

EL GRAN ECLIPSE SOLAR *de 2017*

El primer eclipse total de Sol que atravesará Estados Unidos de costa a costa desde hace 99 años no solo constituye un espectáculo digno de verse, sino también una valiosa oportunidad científica

Jay M. Pasachoff

EL EFECTO «ANILLO DE DIAMANTES», que tiene lugar justo antes y después de la totalidad, muestra la fotosfera solar brillando a través de un valle de la Luna.

Jay M. Pasachoff es astrónomo del Colegio Universitario Williams y presidente del Grupo de Trabajo sobre Eclipses Solares de la Unión Astronómica Internacional. Su trabajo está financiado por la Sociedad Científica National Geographic y la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU.



Me encanta estar al aire libre

durante los eclipses de Sol, disfrutar del universo que parece oscurecerse a mi alrededor mientras las observaciones científicas que voy a realizar se ponen en marcha. En otro tiempo, a la gente le sugería que se fabricase una cámara oscura o incluso que utilizase el rallador de queso de la cocina para presenciar el fenómeno. Pero, en los últimos años, al haber filtros para observar eclipses parciales que solo cuestan un dólar, esos consejos se han quedado desfasados. Ahora cualquiera puede mirar al Sol a través de uno de estos filtros, desde una hora y pico antes de la fase de totalidad, y ver cómo desaparece un buen bocado del disco solar. Durante los últimos minutos previos a la totalidad, nos daremos cuenta de que la naturaleza de la luz ambiente cambia, de que se vuelve espectral. Las sombras se hacen más nítidas porque las produce una fina hoz de luz solar en lugar del disco completo del astro. El aire se enfría y el viento se agita. Es posible que bandas de sombras recorran deprisa el suelo.

Cuando faltan ya pocos segundos, a medida que la Luna se coloca completamente delante del Sol, se filtran solo unos cuantos haces de luz solar a través de los valles de la Luna: del Sol no se ve sino un arco de brillantes perlas, que van desapareciendo hasta que solo subsiste una, tan destellante que parece el diamante de un anillo; tal vez se percibirá un estrecho y rojizo reborde a los lados de la gema y un anillo blanquecino que rodea la silueta lunar. Y entonces el diamante también desaparecerá. En ese momento se pueden y deben apartar los filtros y cabe mirar directamente a lo que queda del Sol, que es una región de su atmósfera hasta ese momento oculta por el cielo azul.

Se trata de la parte media e interior de la corona solar, una emanación de plasma que escapa de la superficie de la estrella. Es aproximadamente igual de brillante que la luna llena (un millón de veces más tenue que el sol de una mañana cualquiera) y tan seguro es mirarla como mirar sin protección a la luna llena. Primero vislumbramos la corona como el anillo donde están montados los diamantes, y luego se nos presenta en todo su esplendor: un halo de gas de color blanco perlado que se extiende hasta una distancia de varios radios solares. Si tenemos suerte, podremos presenciar una violenta erupción de plasma disparada hacia el espacio interplanetario.

Pero, en realidad, ¿de qué sirve que intente describir con palabras un eclipse total de Sol? Es algo tan asombrosamente conmovedor y hermoso que nunca nadie ha logrado describirlo de la manera adecuada. Muchas veces, la gente se dirige a mí después de los eclipses para decirme que son conscientes de que me he esforzado por transmitir la emoción del momento, pero que, a pesar de todo, me he quedado corto. La televisión y las pantallas de ordenador tampoco les hacen justicia. Las fotografías aplanan el rango dinámico y se les escapa el impresionante contraste. Estar al aire libre mientras el universo parece oscurecerse, poco a poco al principio y luego más de 10.000 veces en tan solo unos segundos, es completamente desconcertante y despierta un miedo primario a que el Sol desaparezca para siempre.

Contemplé mi primer eclipse cuando aún era un estudiante universitario de primer año y me quedé enganchado. Desde entonces, he recorrido el mundo entero para ver 65 eclipses de Sol (incluidos 33 eclipses totales). Estoy deseando que llegue el número 66 este 21 de agosto, cuando la franja de totalidad atraviese los Estados Unidos desde la costa oeste hasta la este por primera vez desde 1918.

No presencio estos acontecimientos solo por placer: los eclipses ofrecen a los científicos unas condiciones de visión que no es posible reproducir en las observaciones rutinarias. Aunque podemos equipar los telescopios terrestres con un pequeño disco o cono de metal (construyendo así lo que llamamos un coronógrafo) para ocultar el Sol a nuestro antojo, esos eclipses artificiales no son tan buenos como los reales. Las moléculas de aire que hay en el ambiente dejan el cielo demasiado azul y brillante, incluso si

EN SÍNTESIS

El 21 de agosto, quienes se encuentren en una franja estrecha que irá de Oregón a Carolina del Sur, en EE.UU., disfrutarán de un eclipse total de Sol.

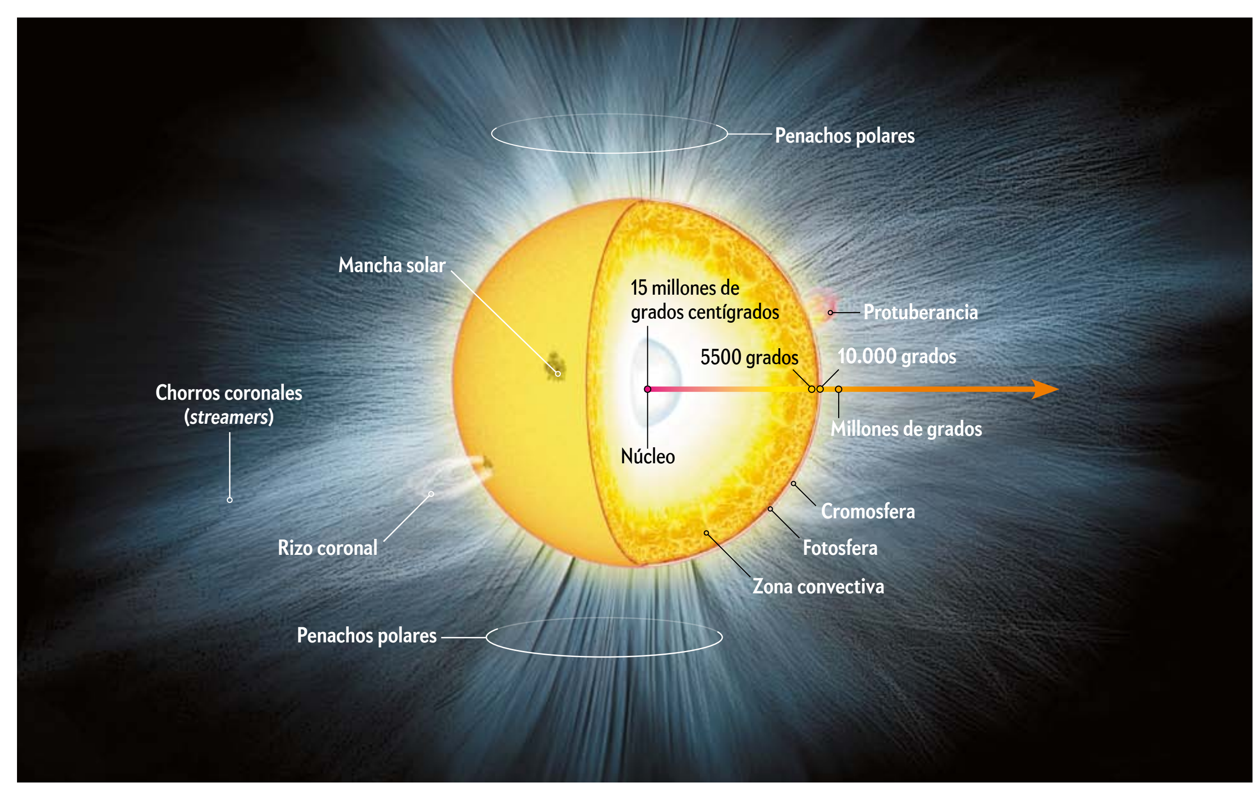
El eclipse ofrece una rara y valiosa oportunidad para estudiar el Sol en unas condiciones que no es posible alcanzar en ningún otro momento.

Los científicos buscarán respuestas a algunos enigmas persistentes; entre ellos, el de por qué está tan caliente la corona solar y el de cómo moldea el campo magnético del Sol la forma de la corona.

PÁGINAS ANTERIORES: JAY M. PASACHOFF, GETTY IMAGES

El Sol ensombrecido

Observar el Sol durante un eclipse solar, cuando su cara está tapada por la Luna, permite a los astrónomos estudiar capas de la atmósfera solar que no pueden visualizarse de ningún otro modo. La corona solar es un halo de gas que fluye desde la superficie del Sol en forma de penachos y rizos. Las observaciones de eclipses podrían ayudar a resolver el misterio de por qué la corona está más caliente que la superficie del Sol.



Dos hipótesis: fulguraciones u ondas

Se han propuesto dos ideas principales para explicar las elevadas temperaturas de la corona solar. Mediante el estudio de la corona durante los eclipses y la medición de la rapidez con que oscila el gas coronal, los investigadores esperan poder distinguir entre ellas, o quizá determinar que en realidad intervienen ambos procesos.

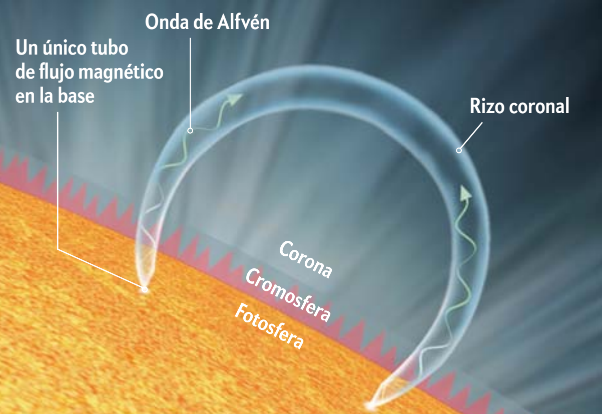
Hipótesis de las nanofulguraciones

Un tipo de modelo de calentamiento propone que millones de diminutas explosiones, denominadas «nanofulguraciones», podrían combinarse para calentar la corona. Estas explosiones se producirían cuando varias «hebras» (tubos de flujo) del campo magnético de la corona se cruzasen entre sí y se reconectasen, liberando con ello energía.

Varios tubos de flujo magnético en la base
Nanofulguración
Campo magnético trenzado
Rizo coronal
Corona
Cromosfera
Fotosfera

Hipótesis de las ondas magnéticas

Otra posibilidad es que ciertas ondas magnéticas conocidas como ondas de Alfvén se propaguen a través de los rizos coronales. Estas ondas, procedentes de ambos pies del rizo, pueden interaccionar entre sí y disipar parte de su energía, ya sea cerca de los extremos inferiores del rizo o a lo largo de la corona.

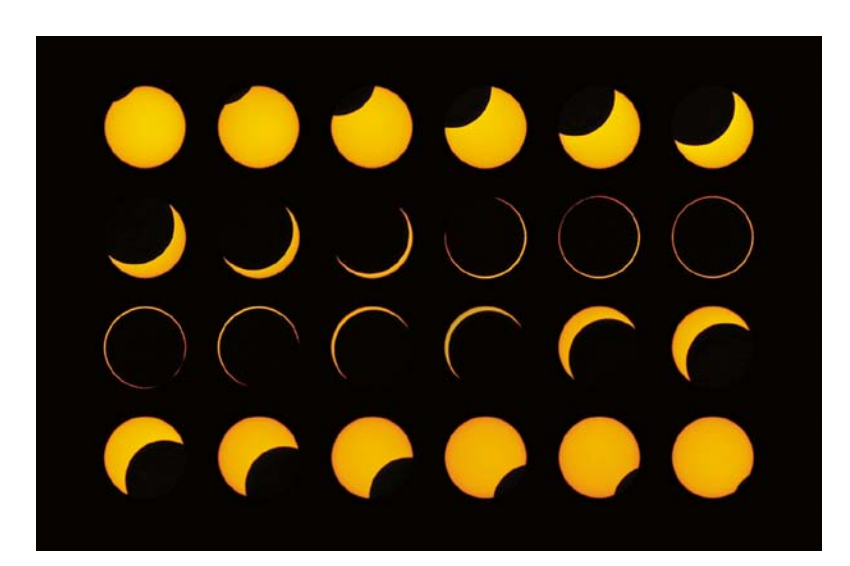


DON DIXON

observamos desde emplazamientos elevados y puros de montaña. Y los coronógrafos espaciales no solo tienen que ocultar el disco solar de todos los días, sino también una ancha banda alrededor de él, puesto que, de lo contrario, se dispersaría demasiada luz dentro del instrumento. Además, cualquier telescopio tiene una resolución limitada y difumina un poco la luz que recibe. Los eclipses naturales no sufren este problema porque en ellos el «telescopio» es todo el sistema Tierra-Luna, que permite una resolución excepcionalmente alta. Combinamos las observaciones que tomamos desde la superficie con las imágenes de los satélites para obtener una visión completa del Sol. Solo cuando estamos bajo la nítida sombra de la Luna logramos ver en luz visible la parte media e interior de la corona.

Es en esas extensiones interiores donde buscamos la respuesta a uno de los enigmas más persistentes de la astrofísica: ¿por qué la temperatura del Sol aumenta a medida que nos alejamos de su superficie? Lo normal es que las cosas se enfríen cuando nos apartamos de un objeto caliente, como ocurre en una fogata o un radiador. En el Sol, la temperatura comienza siendo de 15 millones de grados centígrados en el centro y va disminuyendo de manera constante según nos movemos hacia fuera, hasta llegar a los 5500 grados centígrados en la fotosfera solar, la superficie que emite la luz hacia el espacio. Pero entonces la tendencia se invierte: la temperatura del tenue gas que se encuentra justo por encima de la superficie visible vuelve a subir a más de 10.000 grados centígrados y salta de repente hasta alcanzar millones de grados. Los detalles del fenómeno son aún objeto de debate.

Hemos realizado enormes avances observacionales y teóricos desde que en 1973 describí la ciencia de la corona solar en *Scientific American*. Hoy en día, una flotilla de sondas espaciales observa el Sol en luz ultravioleta y rayos X, longitudes de onda que no podemos ver desde la superficie, y se han desarrollado complejas herramientas para relacionar todas nuestras observaciones. Conocemos a grandes rasgos la solución del problema del calentamiento de la corona (sabemos que tiene que ver con el campo magnético del Sol), pero los detalles siguen sin estar claros. Y este no es ni mucho menos el único problema que nos plantea la corona. Las observaciones que realizaremos durante el próximo eclipse deberían ayudarnos a abordar estas cuestiones.



SECUENCIA DEL ECLIPSE ANULAR de Sol de febrero de 2017, fotografiado por el autor en la Patagonia argentina.

JAY M. PASACHOFF (*fotografías*); CHRISTIAN LOCKWOOD, COLEGIO UNIVERSITARIO WILLIAMS (*composición*)

EL PAISAJE SOLAR

Ya sabemos muchas cosas sobre la corona solar. Para empezar, parece un puercoespín gigante. Dibuja delicados chorros (conocidos en inglés por los astrofísicos como *streamers*, «banderolas» o «gallardetes»), algunos de los cuales son más anchos en su base y acaban en pico a mayor altitud, como cascos puntiagudos. La forma que componen varía con el ciclo de las manchas solares.

Cuando las manchas proliferan, como entre los años 2012 y 2014, los chorros brotan incluso desde latitudes tan altas como los 30 grados norte y sur, de modo que, en conjunto, la corona parece redonda. Durante los períodos en que el número de manchas solares es mínimo, como en el que estamos ahora, la corona se achaparra y los chorros que vemos se limitan a las regiones más cercanas al ecuador solar, mientras que en los polos aparecen «penachos» coronales delgados y rectos. Desde las regiones abiertas que se extienden entre los chorros, un flujo de partículas cargadas, el viento solar, escapa hacia el sistema solar a una velocidad de cientos de kilómetros por segundo, quizás el doble de rápido que el viento solar procedente de otras regiones. En la base de la corona, anclados a la fotosfera, hay pequeños rizos de gas, tal vez formados por múltiples hilos demasiado delgados para distinguirlos con nuestras observaciones actuales. Estos rizos coronales pueden vibrar cuando una onda rebota de un lado a otro a lo largo o a través de ellos.

Toda esta exquisita complejidad es consecuencia del campo magnético solar, generado por el tumultuoso gas que se encuentra en las profundidades de la estrella. Lo que los investigadores no saben, sin embargo, es de qué manera exacta la dinámica del campo magnético determina la temperatura extrañamente alta de la corona. Sabemos que el campo magnético está implicado porque los procesos magnéticos no están sujetos a las restricciones termodinámicas que impiden que la energía fluya por conducción térmica desde la caliente superficie hasta la corona, aún más caliente.

¿EXPLOSIONES U ONDAS?

Hay dos ideas principales sobre cómo el campo magnético del Sol podría transferir parte de su energía a la corona para calentarla. Una posibilidad es que lo haga con diminutas fulguraciones solares. Las fulguraciones son explosiones que ocurren cuando la configuración del campo magnético sufre un cambio abrupto en cuestión de segundos. Si trazamos un mapa del campo en la superficie del Sol, veremos que, en ocasiones, las polaridades norte y sur se mezclan en las regiones de manchas solares. Esto somete el campo magnético a una enorme tensión; para aliviarla, las dos polaridades se conectan de repente de un modo distinto, emitiendo enormes cantidades de energía almacenada. Esta reconexión calienta localmente la corona hasta los 10 millones de grados centígrados o más, desprende un destello brillante y, a veces, expulsa plasma al espacio. Las fulguraciones pueden inutilizar los satélites que orbitan alrededor de la Tierra y podrían suponer un serio peligro para los astronautas que viajen a Marte.

Las fulguraciones que observamos son demasiado esporádicas para explicar la temperatura basal de la atmósfera solar, pero ¿podría ser que la corona también sufriera explosiones

El eclipse del 21 de agosto en Latinoamérica

Aun siendo parcial, el fenómeno se presta a todo tipo de actividades de interés astronómico y educativo

JORGE ZULUAGA

***Dos horas después** el corazón de fray Bartolomé Arrazola chorreaba su sangre vehemente sobre la piedra de los sacrificios (brillante bajo la opaca luz de un sol eclipsado), mientras uno de los indígenas recitaba sin ninguna inflexión de voz, sin prisa, una por una, las infinitas fechas en que se producirían eclipses solares y lunares, que los astrónomos de la comunidad maya habían previsto y anotado en sus códices sin la valiosa ayuda de Aristóteles.*

Así reza el final del relato corto *El eclipse*, del hondureño y guatemalteco Augusto Monterroso. Vale la pena recordarlo en las vísperas del eclipse del próximo 21 de agosto, que será visible también desde la Centroamérica de los mayas. Si bien la zona de totalidad no atravesará aquellas tierras, la visión de un Sol parcialmente cubierto no solo allí, sino también en todo el Caribe y en el norte de Sudamérica, debería traernos el recuerdo de las grandes culturas precolombinas, que, como especula Monterroso, tuvieron posiblemente la capacidad para predecir estos eventos.

La atención se ha centrado en lo que verán millones de personas sobre una fina franja de unos cien kilómetros de ancho que atravesará Estados Unidos. Pero, más allá de esta exclusiva zona, millones de estadounidenses, pero también de latinoamericanos, presenciaremos el eclipse en su versión parcial, en la que la Luna no ocultará por completo el Sol.

¿Qué puede tener de interesante la observación de un eclipse parcial? En realidad son muchas las cosas que los entusiastas de la astronomía y, en particular, maestros, niños y jóvenes, podemos ver, hacer o aprender durante un eclipse parcial de Sol.

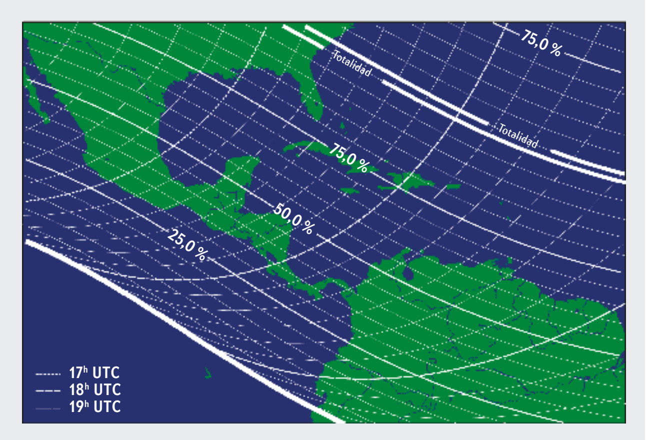
En la Universidad de Antioquia en Medellín nos esforzamos cada año por resaltar eventos astronómicos que, como este, permiten llevar a cabo observaciones o medidas sencillas. Para obtener más detalles sobre las actividades que propondremos a continuación, así como para consultar otros datos de interés, recomendamos visitar la página web bit.ly/astrotiempo-eclipse.

Antes de proseguir, no sobra mencionar que la observación del Sol (con o sin instrumentos) sin la protección adecuada puede causar daños temporales o permanentes en los ojos. Por tanto, antes de observar el eclipse, deberemos contar con asesoría experta sobre las debidas precauciones.

Los eclipses de Sol constituyen el único momento en que resulta posible ver la luna nueva. Aunque podemos deleitarnos observando nuestro satélite en cada una de sus fases a lo largo del mes, ver la luna nueva es imposible, ya que en esta fase la cara iluminada del satélite le da la espalda a la Tierra. Durante el próximo eclipse, sin embargo, ese «mordisco» que usted verá en el Sol será la invitada sorpresa al cielo diurno del lunes 21 de agosto.

¿Por qué los eclipses se ven solo en unas partes del planeta pero no en otras? En comparación con el Sol y otros cuerpos celestes, la Luna se encuentra muy cerca de nosotros. Cuando observamos un vaso en una mesa primero con un ojo y luego con el otro, los objetos del fondo que el vaso tapa cambian dependiendo del ojo. Del mismo modo, cuando vemos la imagen de la Luna proyectada en el cielo, su posición con respecto al Sol cambiará según desde qué zona del planeta la miremos.

Si observamos el eclipse parcial desde dos lugares lejanos (Medellín y Santo Domingo, por ejemplo) la porción del Sol que se verá eclipsada tendrá un tamaño diferente. Una medida cuidadosa de esa diferencia, combinada con la distancia en línea recta entre las dos zonas en cuestión, permite obtener un dato inesperado: la distancia a la Luna. Para ello solo necesitamos algunos conocimientos elementales de trigonometría y un amigo que se encuentre en la otra localización y que esté observando el eclipse en el mismo instante que nosotros.



MAGNITUD Y HORA DE INICIO del eclipse (primer contacto) en Centroamérica, el Caribe y parte de Sudamérica. La magnitud del eclipse (la fracción del diámetro solar eclipsado por la luna) en Puerto Rico, por ejemplo, se situará entre el 80 y el 85 por ciento, y el fenómeno comenzará alrededor de las 18:10:00 horas UTC (14:10:00 de tiempo local en Puerto Rico). Una versión interactiva de este mapa está disponible en bit.ly/astrotiempo-eclipse.

CORTESÍA DE JORGE ZULUAGA

Hay otro hecho notable que tiene lugar durante un eclipse: lo que tapa la Luna es, en realidad, una imagen pasada del Sol, una especie de «espejismo temporal».

Debido a las grandes distancias a las que se hallan y a la velocidad finita de la luz, el Sol y otros cuerpos del sistema solar nunca se encuentran exactamente en el lugar en el que los vemos. El Sol, por ejemplo está siempre desplazado con respecto a su posición real aproximadamente 1/60 de su diámetro. Si bien no podemos notar esta diferencia con nuestros sentidos, la Luna puede ayudarnos a apreciarla durante un eclipse.

Como consecuencia de lo anterior, la Luna comenzará a eclipsar el astro rey antes de lo que lo haría si la luz se propagase a velocidad infinita. Si medimos el tiempo de diferencia entre el inicio del eclipse cuando se ve y el inicio cuando «lo deberíamos ver», es posible calcular la velocidad de la luz.

Bien sea para disfrutar con la contemplación del fenómeno o para conocer un poco mejor el universo, no deje de presenciar el eclipse el 21 de agosto aunque no se encuentre en la zona de totalidad. No se arrepentirá.

***Jorge Zuluaga** es astrónomo y profesor asociado del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia en Medellín.*



ESTA COMPOSICIÓN de docenas de imágenes tomadas durante un eclipse en Libia muestra la cromosfera (*rosa*) y la corona solar.

MILOSLAV DRUCKMÜLLER Y PETER ANIOL, GETTY IMAGES

demasiado pequeñas como para detectarlas por separado? James Klimchuk, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, ha sido un destacado defensor de la idea de estas «nanofulguraciones». Si en la corona estallasen millones de pequeñas explosiones por segundo, cada una con una milmillonésima parte de la energía de una gran llamarada, la mantendrían intensamente caliente.

La principal clase de teorías opuestas a la anterior propone que son las oscilaciones del campo magnético las que calientan la corona. Los rizos coronales que vibran en la parte baja de la corona podrían sacudir el gas circundante, cuya temperatura entonces se incrementaría. Estas ondas podrían adoptar múltiples formas. Se han descartado las ondas sonoras, impulsadas por la presión del gas, pero las ondas de Alfvén impulsadas por el magnetismo o por un híbrido de lo uno y lo otro, las llamadas ondas magnetoacústicas, siguen siendo viables. ¿Podría bastar con ondas magnéticas de algún tipo para elevar la temperatura de la corona hasta los millones de grados?

En principio, los investigadores deberían poder distinguir entre esos dos mecanismos, las nanofulguraciones y las ondas, a partir de la medida de las oscilaciones del gas coronal. Las fluctuaciones con períodos de entre unos 10 segundos y unos minutos delatarían el paso de ondas de Alfvén estándar a lo largo de los rizos coronales. Las observaciones de las vibraciones de la superficie del Sol realizadas mediante una técnica conocida como heliosismología indican que el Sol es capaz de generar esa clase de ondas. Sus oscilaciones más intensas presentan un período, bastante relajado, de cerca de cinco minutos, pero son solo uno de los muchos tipos de ondulaciones que experimenta la superficie.

Los eclipses podrían ser clave para medir las fluctuaciones de los rizos coronales. Observar desde la Tierra presenta importantes ventajas logísticas: nos permite usar instrumentos con mejor resolución temporal que los existentes en las sondas espaciales. Mi equipo utiliza dispositivos de carga acoplada (CCD) de lectura rápida, que toman imágenes muchas veces por segundo. En comparación, las cámaras del Ensamblaje para la Toma de Imágenes de la Atmósfera, del Observatorio de la Dinámica Solar de la NASA, han estado captando imágenes cada 12 segundos a través de varios de sus 10 filtros, y el Generador de Imágenes Solares en el Ultravioleta, a bordo del nuevo satélite geoestacionario GOES-16, de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU., tiene, en el mejor de los casos, una cadencia de 10 segundos para sus 6 filtros.

Lo que hemos encontrado hasta ahora amplía el abanico de posibilidades. Algunas oscilaciones pueden tener períodos menores de un segundo, lo que se ajusta a la predicción teórica de un modo especial de ondas de Alfvén que viajan sobre la superficie de los rizos en vez de por su interior. Pero tenemos muy pocos datos: solo unos minutos de estas observaciones de alta frecuencia, realizadas durante un par de eclipses totales de Sol anteriores. Este año vamos a utilizar nuestro complicado detector CCD, con filtros de un color asombrosamente puro, para aislar el gas coronal caliente y estudiar de nuevo el espectro temporal de las ondas. Esperamos que nuestros resultados ayuden a los investigadores a elegir entre las diferentes teorías del calentamiento de la corona o incluso les hagan llegar a la conclusión de que hay varios mecanismos actuando simultáneamente. En las regiones activas que hay sobre las manchas solares, las condiciones son propicias para las fulguraciones y las ondas son más bien débiles. En las regiones tranquilas, sin embargo, podemos tener ondas en pequeños rizos o billones de nanofulguraciones explotando constantemente.

TÁCTICAS DE ECLIPSE

Se han ideado algunos trucos para aprovechar al máximo las excepcionales oportunidades que ofrecen los eclipses. Las observaciones de eclipses nos permiten inspeccionar la forma de

la corona con una alta resolución espacial y temporal. Nuestras imágenes tomadas desde la superficie terrestre muestran detalles unas 8 veces más sutiles en cada dimensión que el mejor coronógrafo espacial. Los eclipses tienen la desventaja de ser breves y esporádicos, pero podemos contrarrestar eso juntando datos de distintos eclipses y de diferentes localizaciones para un mismo eclipse.

Por ejemplo, observando los eclipses que ocurren a lo largo de los 11 años que dura un ciclo de actividad solar, podemos ir siguiendo los cambios en el grado de redondez de la corona (que refleja la distribución de los chorros en distintas latitudes) y compararlos con otras medidas de la actividad solar. Trabajo con el astrónomo Vojtech Rušin, de la Academia Eslovaca de Ciencias, en este tipo de estudios. Aunque durante un eclipse y desde un lugar dado la corona solo es visible durante unos pocos minutos, podemos combinar las observaciones realizadas desde diferentes emplazamientos para determinar los cambios que sufren los chorros coronales y los penachos a lo largo de las horas que tarda la sombra de la Luna en atravesar la Tierra. Durante el eclipse del 21 de agosto, podremos incluso obtener observaciones continuas de costa a costa gracias a varios proyectos de ciencia ciudadana.

Otra razón para combinar múltiples imágenes de eclipses es que ello permite capturar la enorme gama de brillos de la corona. A partir de imágenes individuales adquiridas con una gran variedad de exposiciones, podremos seleccionar las que estén correctamente expuestas y fusionar una docena de ellas. Miloslav Druckmüller, científico especialista en computación de la Universidad de Tecnología de Brno, en la República Checa, es el experto más reconocido en este tratamiento informático de las imágenes. Dado que el brillo de la corona disminuye unas 1000 veces cuando nos alejamos tan solo un radio solar desde el borde exterior del astro, debemos seleccionar y ensamblar las partes con mejor exposición de docenas de imágenes diferentes. Usando este tipo de imágenes compuestas, procedentes de eclipses totales pasados (observados recientemente en Indonesia, Svalbard, Gabón, Australia y otros sitios), mi equipo ha medido las velocidades en los chorros coronales, los penachos polares y las eyecciones de masa. Este mes de agosto esperamos ampliar significativamente esas observaciones.

Otro truco consiste en aprovechar el progresivo avance de la silueta lunar durante un eclipse. A medida que el borde de la Luna cubre o descubre las regiones con manchas solares, los telescopios podrían registrar cambios bruscos en el brillo del Sol, lo que nos permitiría captar más detalles. Para conseguir la máxima resolución espacial este año, mi equipo está colaborando con Dale Gary, del Instituto de Tecnología de Nueva Jersey; Tim Bastian, del Observatorio Nacional de Radioastronomía de EE.UU., y Tom Kuiper, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. La idea es emplear radiotelescopios para medir los cambios en la emisión de radio a varias frecuencias procedente de cualquier región activa que sea visible a medida que la Luna vaya cubriendo el Sol. A pesar de que estos telescopios están fuera de la franja de totalidad, cada uno de ellos asistirá a un disco solar cubierto en alrededor de un 70 por ciento de su superficie. Obtendremos observaciones de radio de máxima resolución gracias a la Red Solar Expandida de Owens Valley, en California, cuyos 13 radiotelescopios conectados entre sí observarán continuamente el Sol a cientos de frecuencias, desde los 2,5 a los 18 gigahercios. Las imágenes de menor resolución del radiotelescopio Goldstone de Apple Valley, también en California, servirán para rellenar el fondo y mejorarán así la calidad de la imagen. Deberíamos ser capaces de relacionar las posiciones exactas en que aumenta el brillo de los rizos coronales, según se ven en estas longitudes de onda de radio, con los puntos que resplandecen en el ultravioleta o en rayos X en las imágenes de las sondas espaciales y, de esta manera, comprender cómo se calientan los rizos.

El campo magnético de la fotosfera se ha estudiado en detalle, pero sobre el de la corona sabemos mucho menos. Para solucionar ese problema, Ed DeLuca, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y Jenna Samra, estudiante de doctorado de Harvard, en colaboración con los científicos solares Leon Golub, también del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y Philip Judge, del Observatorio a Gran Altitud, dependiente del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), planean seguir el eclipse desde un avión Gulfstream V del NCAR. Desde esa posición, por encima de parte más densa de la atmósfera, que absorbe la radiación infrarroja, serán capaces de medir la intensidad de las líneas espectrales en esas longitudes de onda, con la esperanza de encontrar algunas que sean sensibles al magnetismo.

Si tienen éxito, planean volver a volar durante otro eclipse posterior, añadiendo filtros de polarización para medir el campo magnético de la corona. Al separar las ondas luminosas que presentan diferentes orientaciones, las medidas de la polarización nos ayudan a identificar los diferentes componentes de la corona. Esa parte media interior de la corona que vemos a simple vista durante un eclipse total es luz solar ordinaria dispersada hacia nosotros por un gas altamente ionizado. Dicha dispersión polariza la luz, y el movimiento de los electrones que participan en el proceso difumina las líneas oscuras que, de otra manera, interrumpirían el espectro de arcoíris del Sol. En una región más exterior de la corona, más cerca de la órbita de Mercurio, el polvo del espacio interplanetario hace que la luz rebote hacia nosotros, pero no la polariza ni borra las líneas del espectro solar ordinario. Otros investigadores que se preparan para estudiar la polarización durante el eclipse de este año son Nat Gopalswamy, del centro Goddard, Judge y Steven Tomczyk, ambos del Observatorio a Gran Altitud, y Padma Yanamandra-Fisher, del Instituto de Ciencias del Espacio. Una vez que el telescopio solar Daniel K. Inouye, que se está construyendo en Maui, inicie sus observaciones en 2018, uno de sus instrumentos debería ser capaz de medir directamente el campo magnético de la corona mediante el estudio de la polarización de las líneas espectrales infrarrojas. Y la sonda solar Parker, de la NASA, tras su lanzamiento en 2018, volará a través de la corona y ayudará a desvelar las incertidumbres del calentamiento coronal.

ESFUERZO MUNDIAL

En resumen, el esfuerzo observacional será realmente enorme durante este eclipse, y aquí no he hecho más que arañar la superficie. La NASA ha financiado once propuestas, seis para estudios coronales y cinco relacionadas con la respuesta de la atmósfera terrestre al brusco enfriamiento causado por el eclipse, un asunto en el que he estado trabajando con Marcos Peñaloza Murillo, de la Universidad de los Andes, en Venezuela. Otro importante grupo de investigación estadounidense que utiliza los eclipses para estudiar la corona es el dirigido por Shadia Habbal, del Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawái. Su equipo, al que ella llama «los *sherpas* del viento solar», tomará imágenes de la corona por medio de filtros escogidos para detectar plasmas a diferentes temperaturas. La nueva ayuda a la investigación que la NASA le ha concedido a Habbal costeará la mejora del

espectrógrafo de imágenes de doble canal recientemente diseñado por el grupo, que fue probado con éxito en 2015. Diversas observaciones desde la superficie y el espacio proporcionarán el estudio más exhaustivo de la corona infrarroja, su espectro y su polarización realizado hasta la fecha.

Mi grupo se ha beneficiado de diversas colaboraciones internacionales durante los 33 eclipses totales de Sol que he observado desde lugares de todo el mundo. Ha llegado la hora de que correspondamos a esta hospitalidad. Esperamos que los análisis e imágenes de gran calidad de Serge Koutchmy, del Instituto de Astrofísica de París, y sus colaboradores contribuyan al estudio del eclipse de agosto. En los lugares donde trabajará mi propio equipo se nos sumarán colegas de Australia, Eslovaquia, Grecia, Japón, China, Irán y otros países.

La ciencia ciudadana también tendrá numerosas oportunidades de contribuir a los esfuerzos de los investigadores. Participo en el proyecto Eclipse Megamovie («Megapelícula del Eclipse»), con base en el Laboratorio de Ciencias Espaciales de la Universidad de California en Berkeley y dirigido por Laura Peticolas. La gente podrá enviar imágenes a través de una interfaz de Google para archivarlas y montarlas en películas que abarcarán todo el continente y estarán disponibles para que las vean y analicen los ciudadanos. En la misma línea, Matt Penn, del Observatorio Solar Nacional de EE.UU., ha organizado el experimento Ciudadano CATE (siglas en inglés de «eclipse telescópico en la parte continental de EE.UU.»), una colaboración que tratará de observar el eclipse con instrumentos idénticos (pequeños telescopios y cámaras CMOS), desde unas 70 localizaciones distribuidas por todo el país.

Este agosto también se llevará a cabo un experimento inusual que no tiene nada que ver con la corona; de hecho, la corona se interpondrá en nuestro camino. Como es bien sabido, Arthur Eddington puso a prueba la teoría general de la relatividad de Einstein durante un eclipse en 1919. Para ello, buscó señales de que la masa del Sol estaba curvando la luz de las estrellas lejanas situadas detrás de él, un efecto causado en realidad por la deformación relativista del espaciotiempo. Me he pasado décadas diciendo que tenemos mejores cosas que hacer durante un eclipse total que repetir este experimento. Después de todo, hoy en día los físicos tenemos maneras más precisas de poner a prueba la teoría de la relatividad. Sin embargo, hay nuevas técnicas de observación pueden hacer que esta investigación resulte útil, o al menos interesante, durante el eclipse de este año.

Don Bruns, físico jubilado de California, llevará a cabo esas observaciones. Tiene complicados planes para calibrar su telescopio midiendo las imágenes de muchas estrellas nocturnas. Un intento anterior de utilizar las observaciones tomadas con cámaras digitales réflex de un solo objetivo (DSLR) durante el eclipse de 2006, realizado por el belga Jean-Luc Dighaye (y que Carlton Pennypacker, de la Universidad de California en Berkeley y el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y yo tratamos de ayudar a analizar) fracasó, pero eso fue con los grandes píxeles de las cámaras DSLR comerciales. Esperamos que los píxeles más pequeños y la calibración precisa de un detector CCD astronómico conduzcan al éxito. Bradley Schaefer, de la Universidad Estatal de Luisiana, sostiene que los instrumentos modernos de adquisición de imágenes tienen suficiente resolución y sensibilidad como para superar la precisión de anteriores pruebas, y también intentará observar el efecto. Gracias a un catálogo recién publicado, que se basa en los datos del satélite Gaia, de la Agencia Espacial Europea, ahora conocemos las posiciones de las estrellas con una precisión altísima, por lo que podríamos buscar cualquier desviación causada por el Sol con menos calibraciones del telescopio.

LOS LUGARES DEL ECLIPSE

El eclipse del 21 de agosto comenzará al amanecer en el océano Pacífico. La totalidad alcanzará la parte continental de Estados Unidos en Oregón, con fases parciales visibles por todo Estados Unidos, Canadá y México, y aun más al sur, en Sudamérica. Tras abandonar Carolina del Sur cerca de Charleston unos 90 minutos más tarde, el eclipse total terminará al anochecer en el Atlántico, con fases parciales visibles desde el noroeste de África y Europa occidental.

Suponiendo que el tiempo acompañe, los científicos y el público general deberían quedar impresionados, incluso abrumados. Al combinar los resultados obtenidos en tierra con las observaciones de los satélites en el visible, ultravioleta, rayos X y ondas de radio, alcanzaremos la visión más completa de la atmósfera solar que jamás hayamos tenido.

Cualquier conclusión que saquemos respecto al Sol también será aplicable a los billones de estrellas como el Sol que no podemos observar con el mismo detalle. A algunos les podrá parecer desconcertante que nuestro conocimiento del Sol, posiblemente el objeto celeste mejor estudiado, sea tan incompleto. Pero yo veo las preguntas para las que aún no tenemos respuesta como una excusa maravillosa para compartir una de las experiencias más increíbles de la naturaleza.

En cuanto a mí, en los eclipses de hace décadas estaba tan ocupado tomando fotografías durante la fase de totalidad que apenas tenía tiempo de mirar hacia arriba para verla. Pero ahora, gracias a la automatización permitida por la informática, puedo disfrutar de unos segundos para saborear el eclipse mientras las cámaras disparan y los sensores electrónicos envían sus datos a los ordenadores. Estoy deseando ver mi sexagésimo sexto eclipse solar desde Oregón. Aquellos que estén tan fascinados como yo pueden comenzar a prepararse para los eclipses de 2019 y 2020 en Chile y Argentina, y el eclipse total de Sol de 2024, que recorrerá el este de Estados Unidos desde Texas hasta Maine. Y para un eclipse anular que, en 2023, mostrará fases parciales a lo largo de América del Norte y del Sur. IyC

Nota de la redacción: En España, el eclipse del 21 de agosto será parcial, con solo una pequeña porción del disco solar cubierta a última hora de la tarde. El 12 de agosto de 2026 habrá un eclipse total que será visible como tal en el norte de España, y el 2 de agosto de 2027 otro eclipse total pasará por el estrecho de Gibraltar. Los datos pueden consultarse en aa.usno.navy.mil/data/docs/Eclipse2017.php

PARA SABER MÁS

The solar corona. Jay M. Pasachoff en *Scientific American*, vol. 229, n.º 4, octubre de 1973.

Structure and dynamics of the 2012 november 13/14 eclipse white-light corona. J. M. Pasachoff y otros en *Astrophysical Journal*, vol. 800, n.º 2, art. 90, 20 de febrero de 2015.

Key aspects of coronal heating. James A. Klimchuk en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 373, n.º 2042, art. 20140256, 28 de mayo de 2015.

The Sun. Leon Golub y Jay M. Pasachoff. Reaktion Books y University of Chicago Press, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La paradoja de la corona solar. Bhola N. Dwivedi y Kenneth J. H. Phillips en *IyC*, agosto de 2001.

La verdadera corona solar. Richard Woo en *IyC*, octubre de 2010.

12 de agosto de 2026
9 de abril de 2043*
1 de junio de 2030
2 de agosto de 2027
20 de marzo de 2034
21 de junio de 2020
2 de julio de 2038
5 de enero de 2038
26 de diciembre de 2019
21 de mayo de 2031
30 de abril de 2041
2 de agosto de 2046
22 de julio de 2028
20 de abril de 2023
13 de julio de 2037
25 de noviembre de 2030
9 de mayo de 2032
17 de febrero de 2026
28 de febrero de 2044*
3 de octubre de 2043*

MIL AÑOS DE ECLIPSES

Las oportunidades de ver cómo el Sol desaparece abundan si uno vive muchos

La expectación ante el eclipse del 21 de agosto de 2017 es enorme. Sin embargo, los eclipses solares ocurren por lo menos dos veces al año, cuando la Luna y la Tierra se alinean con el Sol. Lo hasta cierto punto inusual de este evento es que la Luna tapará por completo la estrella, en vez de hacerlo parcialmente, y que la banda de oscuridad proyectada sobre la Tierra caerá sobre millones de personas, y no en el mar, sobre el plancton, o en los polos, sobre osos polares y pingüinos. Durante los próximos treinta años tendrán lugar cuarenta y seis eclipses solares de diferentes tipos. Búsquese un amigo y vaya.

—Mark Fischetti

PREDICCIONES DE ECLIPSES: FRED ESPENAK, CIENTÍFICO EMÉRITO DEL CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES DE LA NASA; ASESORAMIENTO: MICHAEL ZEILER

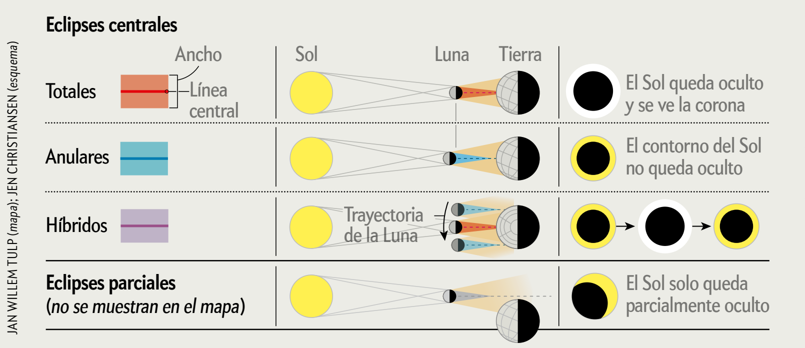
**La línea central de estos raros eclipses no toca la Tierra por muy poco, de modo que la máxima oscuridad solo se ve desde una pequeña área.*

10 de junio de 2021
30 de marzo de 2033
21 de junio de 2039
23 de agosto de 2044
20 de abril de 2042
21 de agosto de 2017
8 de abril de 2024
12 de agosto de 2045
5 de febrero de 2046
2 de septiembre de 2035
14 de noviembre de 2031
26 de enero de 2028
14 de octubre de 2023
25 de octubre de 2041
2 de julio de 2019
16 de febrero de 2045
9 de marzo de 2035
12 de septiembre de 2034
6 de febrero de 2027
26 de diciembre de 2038
2 de octubre de 2024
14 de diciembre de 2020
26 de febrero de 2017
14 de octubre de 2042
4 de diciembre de 2021
15 de diciembre de 2039

SOLARES

años y viaja

Trayectorias de eclipses, 2017-2046



JAN WILLEM TULP (*mapa*); JEN CHRISTIANSEN (*esquema*)

Diferentes maneras de ocultar el Sol

En los eclipses centrales (*mostrados en el mapa*), el eje central de la sombra lunar toca la Tierra; toda la Luna, vista desde la Tierra en una franja alrededor de donde el eje de la sombra la toca, pasa entonces por delante del Sol (pero también lo hace en los marcados con un asterisco, que no son centrales en sentido estricto y cuya zona de oscuridad carece de línea central). Los hay de tres tipos. El eclipse es total cuando la Luna está lo bastante cerca de la Tierra como para tapar completamente el Sol. Es anular cuando está más lejos de la Tierra y cubre solo la parte central del Sol. Y es híbrido cuando la distancia a la Luna varía durante el evento. La franja de completa oscuridad en la superficie de la Tierra producida por un eclipse total es estrecha; cuanto más cerca está la Luna, más ancha es. (Los mapas planos exageran la anchura en los polos).

Eclipses hasta el año 3000

Las criaturas de la Tierra presenciaremos 2354 eclipses solares entre los años 2017 y 3000. Se producirán a intervalos regulares de un poco menos de seis meses (*diagrama orbital*), lo que significa que la temporada de eclipses se va desplazando en el calendario cada año (*gran espiral*). Además, los eclipses ocurren en ciclos; cada uno de los eclipses de un mismo ciclo arroja una banda de sombra similar sobre la Tierra (*mapa*). Durante un eclipse total, la oscuridad completa en cualquier lugar determinado dura menos de siete minutos, así que si quiere ver uno, planéelo con tiempo.

Cómo leer la espiral

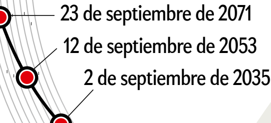
Cada punto indica un eclipse solar

● Total ● Anular ● Híbrido ● Parcial

Para los eclipses parciales, el tamaño del punto representa la «magnitud», la porción del Sol tapada por la Luna

• Pequeña ● Grande

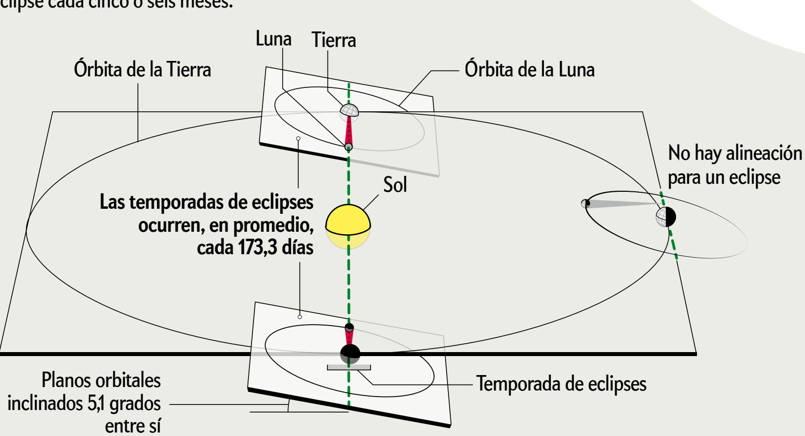


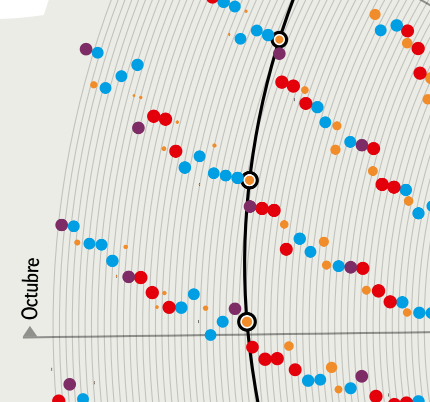


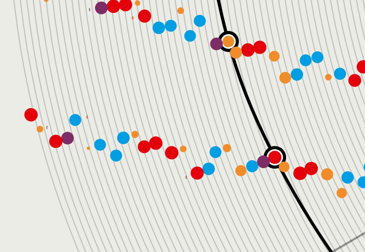


Cómo se crea un eclipse

Los eclipses solares ocurren cuando la Tierra, la Luna y el Sol se alinean en un mismo eje. Debido a que tanto la Tierra como la Luna tienen órbitas elípticas, y a que la órbita de la Luna está inclinada 5,1 grados con respecto a la de la Tierra, la alineación solo puede producirse dentro de un periodo de 34,5 días, la «temporada de eclipses». Estas temporadas ocurren cada 173,3 días, lo que significa que, como poco, hay un eclipse cada cinco o seis meses.





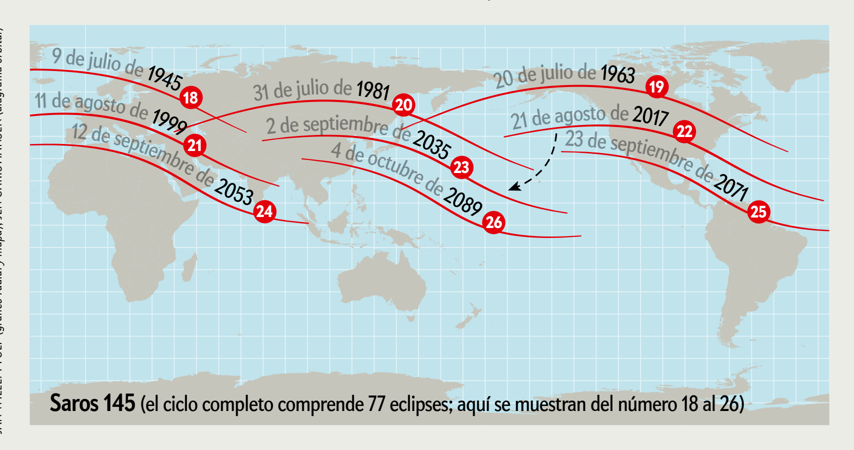


Zona exterior:
Cada banda entre los anillos exteriores representa 10 años, desde el decenio 2017-2026 al 2987-2996. Los eclipses entre los años 2997 y 3000 se encuentran más allá del último anillo.

El peculiar ciclo de saros

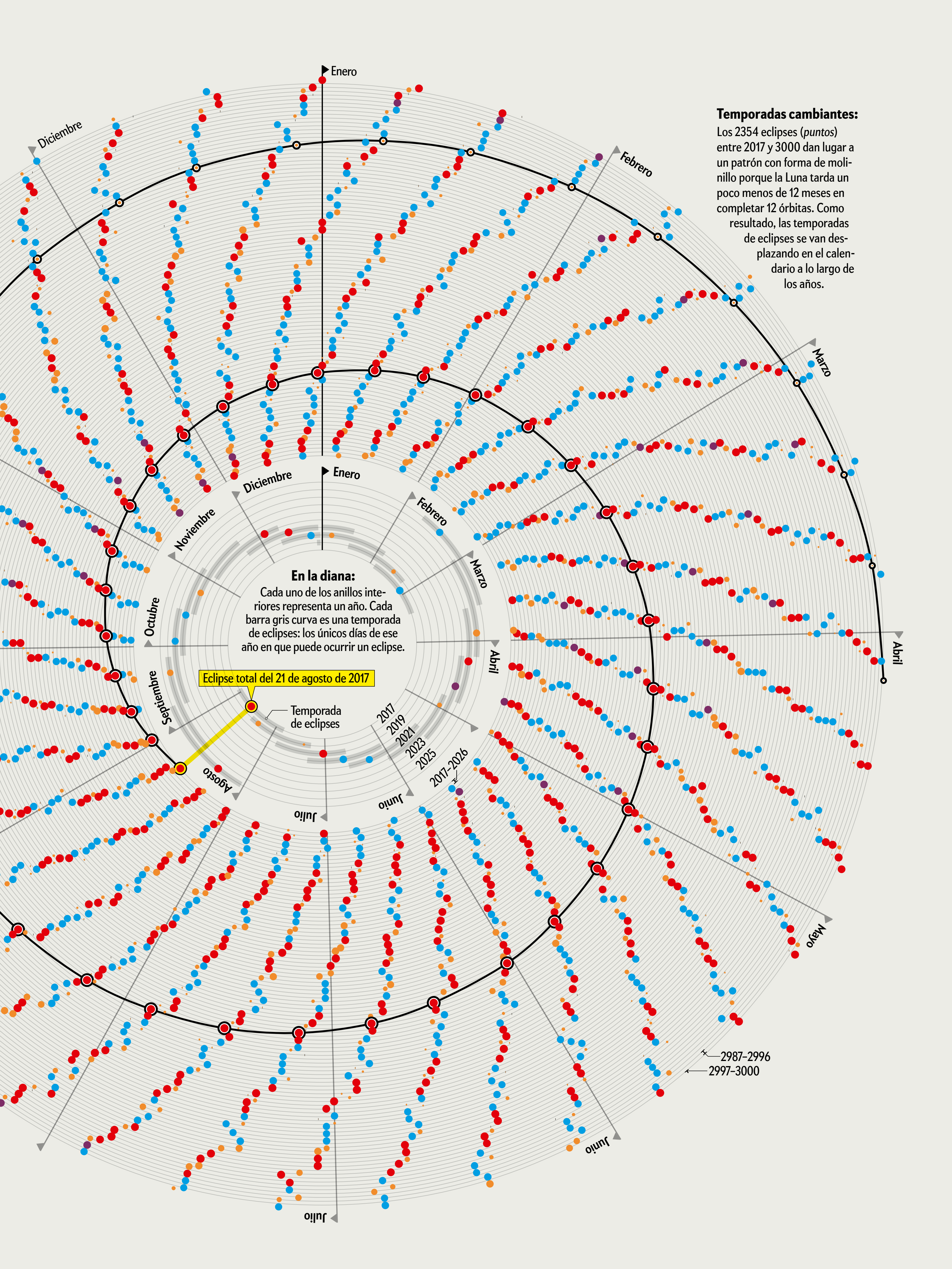
Los eclipses ocurren en ciclos porque las órbitas de la Tierra y la Luna siguen una pauta con respecto al Sol, que se repite (de manera aproximada) cada 18 años y 11 días y un tercio*, intervalo conocido como «saros». Los eclipses separados por un saros producen una franja de oscuridad similar en la Tierra, pero debido al tercio de día extra, la trayectoria de cada nuevo eclipse se desplaza unos 120 grados hacia el oeste. El eclipse del 21 de agosto de 2017 pertenece a la serie Saros 145. El próximo eclipse de este ciclo tendrá lugar el 2 de septiembre de 2035 y se extenderá sobre Asia y el océano Pacífico. Cada nuevo eclipse del ciclo irá migrando hacia el sur, hasta superar la Antártida. Cada ciclo de saros dura entre 1225 y 1550 años y genera de 69 a 87 eclipses que se van moviendo hacia el sur o hacia el norte. Después, la trayectoria del siguiente eclipse sobrepasa el Polo Sur o el Norte y no llega a tocar la Tierra, con lo que concluye el ciclo.

** En ocasiones el intervalo es de 18 años y 10 días y un tercio, dependiendo de los años bisiestos.*



Saros 145 (el ciclo completo comprende 77 eclipses; aquí se muestran del número 18 al 26)

PREDICCIONES DE ECLIPSES: FRED ESPENAK, CIENTÍFICO EMÉRITO DEL CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES DE LA NASA; ASESORAMIENTO: MICHAEL ZEILER
JAN WILLEM TULP (*gráfico radial y mapa*); JEN CHRISTIANSEN (*diagrama orbital*)


Temporadas cambiantes:
Los 2354 eclipses (*puntos*) entre 2017 y 3000 dan lugar a un patrón con forma de molinillo porque la Luna tarda un poco menos de 12 meses en completar 12 órbitas. Como resultado, las temporadas de eclipses se van desplazando en el calendario a lo largo de los años.
En la diana:
Cada uno de los anillos interiores representa un año. Cada barra gris curva es una temporada de eclipses: los únicos días de ese año en que puede ocurrir un eclipse.
Eclipse total del 21 de agosto de 2017
Temporada de eclipses
2017
2019
2021
2023
2025
2017–2026
2987–2996
2997–3000
Enero
Febrero
Marzo
Abril
Mayo
Junio
Julio
Agosto
Septiembre
Octubre
Noviembre
Diciembre

por Jon Lomberg y Leo Blitz

El cielo en la Tierra

El Jardín de la Galaxia cumple diez años

En 2007 se inauguró, en el Santuario de los Jardines de la Paz de Paleaku, en Kona (Hawái), el Jardín de la Galaxia, un jardín de 30 metros de diámetro que constituye el primer modelo a gran escala y explorable de la Vía Láctea realizado en el mundo. El proyecto nacía de la adaptación del *Retrato de la Vía Láctea*, un mural encargado por el Museo Nacional del Aire y el Espacio del Instituto Smithsoniano en Washington D. C. en el que los autores colaboraron en 1992.

En esta versión botánica de nuestra galaxia, las nebulosas que originan las estrellas están representadas mediante flores. Las nebulosas forman estrellas, del mismo modo que las flores dan lugar a semillas. Esas estrellas se dispersan igual que las semillas y, con el tiempo, acaban devolviendo su gas a la galaxia para formar nuevas nebulosas y estrellas, un ciclo que puede simbolizarse a través del crecimiento de las plantas. Predomina un arbusto de hojas moteadas. Es muy fácil imaginar que sus manchas corresponden a estrellas, salvo que debería haber muchas más (alrededor de un millón por hoja) para igualar el número de astros que hay en ese pedazo de galaxia.

A esta escala, 1 metro representa unos 3000 años luz; 1 centímetro, unos 33 años luz. La distancia del Sol al centro de la galaxia, 26.000 años luz, es aquí de unos 8 metros. El Sol y la mayoría de las estrellas que pueden apreciarse a simple vista se encuentran en la misma hoja. Todas las demás estrellas que forman las familiares constelaciones están dentro de una esfera imaginaria del tamaño de un balón de baloncesto alrededor del Sol.

En la parte central se halla la barra galáctica, definida por rocas y plantas. Con un tamaño, forma y orientación correctos, apunta casi directamente al Sol. En el mismo centro brota una fuente que simboliza el agujero negro supermasivo del centro galáctico.

Cuando se cumple el décimo aniversario de este proyecto divulgativo, nos alegra anunciar que se están construyendo dos nuevos «jardines galácticos»: uno en los terrenos de la Fundación de Educación Aeroespacial de Delaware y otro en Pamplona, gracias a la colaboración del Ayuntamiento y el Planetario de esta localidad. Dado que ambos se hallan en climas diferentes al de Hawái, sus jardineros han tenido que encontrar otras plantas, árboles y flores para representar las distintas partes de la galaxia. Esperamos que estos nuevos jardines incorporen avances como el descubrimiento de la galaxia enana de Sagitario o la nueva estructura del brazo de Orión.

—Jon Lomberg
Ilustrador científico
—Leo Blitz
Universidad de California en Berkeley





EL SOL Y ALGUNAS DE LAS ESTRELLAS más brillantes aparecen simbolizados aquí por pequeños «pendientes» enganchados en una hoja. Sirio, a tan solo 9 años luz de distancia, está casi tocando a nuestro Sol. Vega, en el Triángulo de Verano, está a unos 0,75 centímetros de distancia. Las Pléyades se encuentran agrupadas en otra hoja, a 13 centímetros. La brillante estrella supergigante Deneb (*no se muestra*), también en el Triángulo de Verano, está a unos 1500 años luz (medio metro) del Sol y es la estrella más distante que el ser humano puede ver sin ayuda de una lente.

LA FUENTE DEL AGUJERO NEGRO, en el centro del jardín. Alrededor, un suelo de ceniza roja representa la población de estrellas gigantes rojas que dominan el centro de nuestra galaxia.

LOS PENACHOS representan cúmulos globulares, que a menudo se encuentran bastante por encima del disco de la galaxia.

por Mario Livio

Mario Livio es astrofísico y autor de conocidos títulos de divulgación científica.



Un ensayo inédito de Churchill sobre la vida extraterrestre

El estadista británico razona como un científico en un artículo hasta ahora desconocido sobre la posible existencia de alienígenas

Winston Churchill ha pasado a la historia como uno de los políticos más influyentes del siglo xx, un historiador lúcido y un elocuente orador que lideró su país durante la Segunda Guerra Mundial. Cabría añadir que le apasionaban la ciencia y la tecnología.

En 1896, a los 22 años, de servicio en el Ejército británico en la India, leyó *El origen de las especies* de Darwin y se inició en la física. En los años veinte y treinta del siglo pasado escribió para diarios y revistas artículos de divulgación sobre la evolución y la célula. En uno de ellos, titulado «Dentro de 50 años», publicado en 1931 en *The Strand Magazine*, describió la fusión nuclear: «Si pudiéramos hacer que los átomos de hidrógeno de una libra de agua se combinaran para formar helio, la energía generada bastaría para alimentar una máquina de 1000 caballos un año entero». Es probable que hablara de ello con el físico Frederick Lindemann, amigo y futuro asesor.

Churchill impulsó durante la Segunda Guerra Mundial el desarrollo del radar y el programa nuclear británico. Departía con frecuencia con científicos como Bernard Lovell, pionero de la radioastronomía. La postura que adoptó en una discusión sobre el uso de métodos estadísticos en la lucha contra los submarinos alemanes es reveladora. A la observación del almirante del aire Arthur «Bombardero» Harris, «¿Vamos a luchar con armas o con reglas de cálculo?», Churchill habría respondido, «Probemos la regla de cálculo».

Como primer ministro, fue el primero en contratar a un asesor científico, Lindemann, al principio de la guerra. Creó las condiciones favorables para el desarrollo de la ciencia en el Reino Unido, financiando la construcción de laboratorios y telescopios y desarrollando la tecnología que propiciaría los descubrimientos e invenciones de posguerra en áreas como la genética molecular o la cristalografía de rayos X.

Aun así, me sorprendió mucho que Timothy Riley, director del Museo Nacional Churchill en Fulton, Misuri, me mostrara el año pasado, en el curso de una visita, un manuscrito mecanografiado de Churchill titulado «¿Solos en el universo?». En sus once páginas se especulaba razonablemente sobre la búsqueda de vida extraterrestre.

Churchill compuso el primer borrador en 1939, en vísperas de la guerra, probablemente para el dominical londinense *News of the World*. Lo revisó a finales de los años cincuenta, durante una estancia en la villa de su editor, Emery Reves, en el sur de Francia. Cambió el título original, «¿Solos en el espacio?», para adecuarlo al conocimiento y la terminología científicos. En los años ochenta, Wendy Reves, la esposa del editor, donó el manuscrito a los archivos del Museo Nacional Churchill en Estados Unidos.

Riley había redescubierto el texto tras asumir la dirección del museo. El ensayo había permanecido en manos de Reves y nunca había sido publicado ni estudiado por un académico. Es difícil describir la sensación que tuve al saber que era el primer científico que lo examinaba.

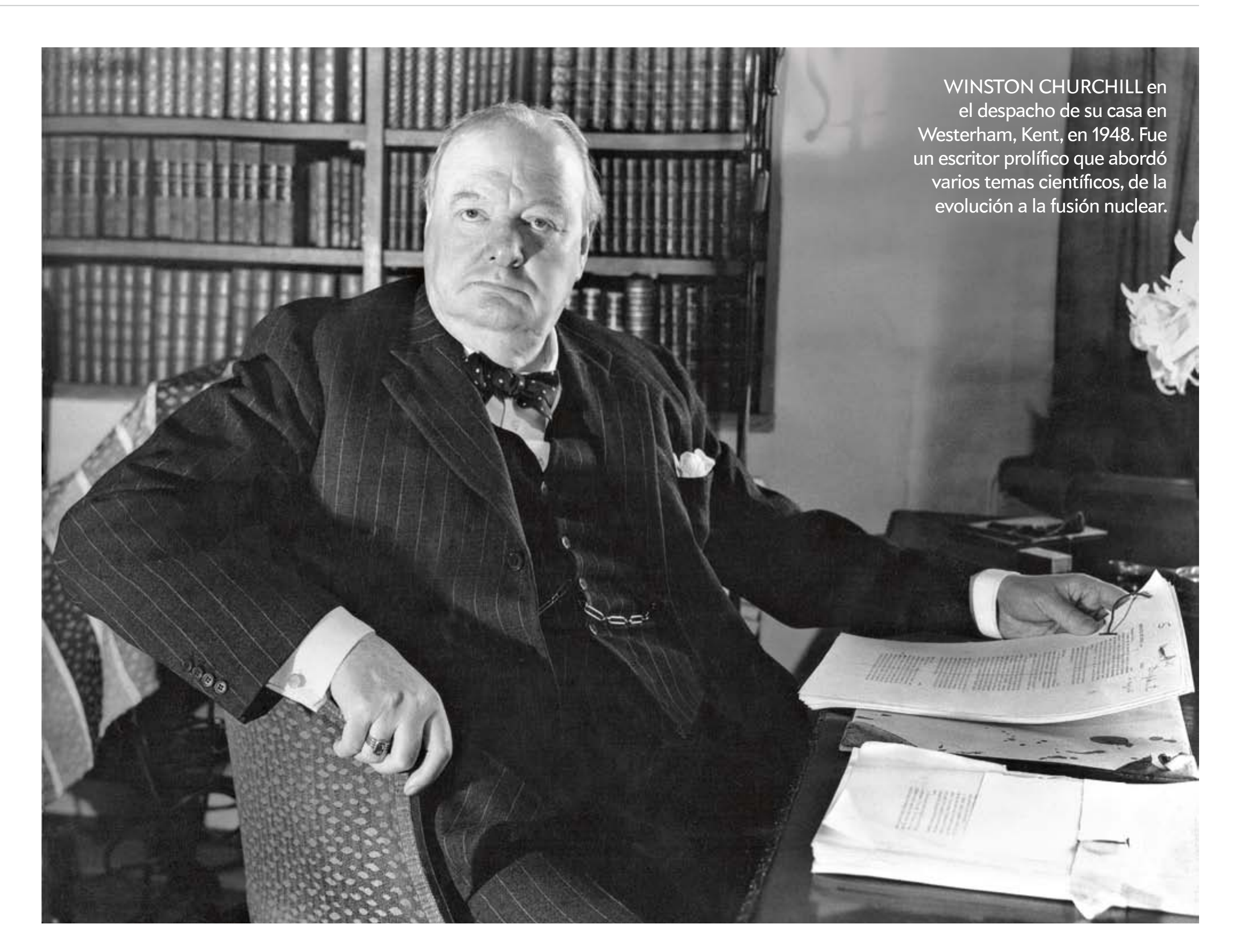
A continuación presentaré el argumento de Churchill. Cuando tantos políticos dan la espalda a la ciencia, conviene recordar a un líder que se interesó por ella.

Pensamiento moderno

El razonamiento de Churchill muestra paralelismos con argumentos actuales de la astrobiología. Se basa en el llamado «principio copernicano», según el cual es difícil creer que la vida humana sea única en el universo [*véase* «(In)trascendencia cósmica», por Caleb Scharf; Investigación y Ciencia, marzo de 2015]. Empieza por definir la característica más importante de la vida, la capacidad de «crecer y multiplicarse». Al no ver claro que los virus puedan considerarse seres vivos, Churchill se concentra en las formas de vida «altamente organizadas», como sería la multicelular.

La primera idea es que «todos los organismos conocidos de este tipo requieren agua», el componente principal de los cuerpos y las células. Aunque no se pueden descartar otros líquidos, «el conocimiento actual no permite suponer que puedan desempeñar un papel equivalente». La presencia de agua en estado líquido sigue guiando la búsqueda de vida extraterrestre en Marte, en las lunas de Saturno y Júpiter, y en los planetas extrasolares, más allá de nuestro sistema. El agua no solo es esencial para la vida sobre la Tierra, sino que abunda en el cosmos. Es un maravilloso solvente universal, capaz de disolver casi cualquier sustancia, y permite el transporte de moléculas como los fosfatos a través de la membrana celular.

Churchill define a continuación lo que hoy conocemos como la zona de habitabilidad o «de Ricitos de Oro», la pequeña región alrededor de una estrella donde el abanico de temperaturas permite la existencia de agua en estado líquido en la superficie de planetas rocosos. La vida precisa regiones con una temperatura comprendida «entre unos pocos grados bajo cero y el punto de ebullición del agua». La temperatura de la Tierra depende de su distancia al Sol. Churchill discute la capacidad de un planeta de conservar su atmósfera: cuanto más caliente está un gas, más


WINSTON CHURCHILL en el despacho de su casa en Westerham, Kent, en 1948. Fue un escritor prolífico que abordó varios temas científicos, de la evolución a la fusión nuclear.

© AGE FOTOSTOCK/EVERETT COLLECTION

rápido se mueven sus moléculas y más fácilmente pueden escapar. En consecuencia, el planeta debe ejercer una gravedad intensa sobre los gases atmosféricos para retenerlos.

Ese razonamiento lleva a la conclusión de que Marte y Venus son, junto con la Tierra, los únicos planetas del sistema solar que podrían albergar vida. Descarta los planetas exteriores por demasiado fríos, Mercurio por demasiado caliente en la cara que da al Sol y demasiado frío en la cara opuesta, y la Luna y los asteroides porque sus gravedades son demasiado débiles para atrapar gases atmosféricos.

Churchill redactó el ensayo tras la emisión, en Estados Unidos, de *La guerra de los mundos*, una adaptación radiofónica de la novela de H. G. Wells (1898) que generó una auténtica «fiebre marciana» mediática. Desde finales del siglo XIX se especulaba con la existencia de vida en el planeta rojo. En 1877, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli describió unas marcas lineales (*canali*) en la superficie de Marte; la traducción incorrecta como «canales» hizo creer que habían sido construidos por una civilización. No eran más que ilusiones ópticas, pero la idea de que existían marcianos persistió. Protagonizaron numerosas novelas de ciencia ficción, que culminaron con las *Crónicas marcianas* de Ray Bradbury (Doubleday, 1950), publicada en el Reino Unido como *The silver locusts* («Las langostas de plata», Rupert Hart-Davis, 1951).

Perspectiva cósmica

Churchill discute también la posibilidad de que otras estrellas cuenten con planetas como el nuestro. Razona que «el Sol no es sino una estrella más de nuestra galaxia, que contiene miles de millones de estrellas más». Considera que los planetas se forman a partir del gas que se desprende de una estrella cuando otra estrella pasa cerca de ella, un modelo propuesto por el astrofísico James Jeans en 1917, posteriormente descartado. Como tales encuentros son raros, Churchill deduce que «nuestro Sol puede ser realmente excepcional y tal vez único».

En su fragmento más brillante, el estadista hace gala de un sano escepticismo científico: «Esta especulación se basa en la hipótesis de que los planetas se formaron de este modo, pero podría no haber sido así. Si han podido formarse millones de estrellas binarias, ¿por qué no sistemas planetarios?».

De hecho, la teoría actual de la formación planetaria, basada en la agregación de numerosos cuerpos pequeños en un núcleo rocoso, difiere mucho de la de Jeans. Churchill escribe: «No me engaño hasta el extremo de pensar que mi sol es la única estrella que cuenta con una familia de planetas».

Alcanza así la conclusión de que una fracción grande de planetas extrasolares «presentará el tamaño adecuado para tener agua en la superficie y algún tipo de atmósfera» y algunos se hallarán «a la distancia precisa de su Sol para mantener una temperatura adecuada».

Esto ocurría décadas antes de que, a finales del siglo XX, se descubrieran miles de planetas extrasolares, y años antes de que el astrónomo Frank Drake presentara en 1961 su argumento probabilístico sobre la existencia de civilizaciones capaces de



LA SUPERFICIE DEL PLANETA ROJO en una imagen captada por la Sonda de Reconocimiento de Marte, en busca de pruebas de la existencia de agua.

comunicarse a través del cosmos. Los datos recogidos por el observatorio espacial Kepler indican que la Vía Láctea contiene probablemente más de mil millones de planetas del tamaño de la Tierra en la zona de habitabilidad de estrellas como el Sol o más pequeñas.

Ante la magnitud de las distancias implicadas, Churchill concluye que tal vez no lleguemos nunca a saber si tales planetas «albergan seres vivos o plantas».

Una visión ambiciosa

Churchill ve muchas posibilidades de explorar el sistema solar: «Puede que algún día, en un futuro no muy lejano, sea posible viajar a la Luna, o incluso a Venus o Marte». En cambio, los viajes o las comunicaciones interestelares presentan grandes dificultades. La luz emplea más de cuatro años en ir y otros tantos en volver a la estrella más cercana, y la galaxia espiral más cercana a la Vía Láctea, Andrómeda, se encuentra cientos de miles de veces más lejos que la estrella más cercana.

Churchill aventura que «con cientos de miles de nebulosas, cada una de las cuales contiene miles de millones de soles, es muy probable que muchos de ellos posean planetas en los que la vida no sea imposible». Es evidente que conocía el trabajo del astrónomo Edwin Hubble, descubridor en los años veinte y treinta de numerosas galaxias más allá de la Vía Láctea, que estimaciones recientes cifran en unos 2 billones.

El ensayo concluye en un tono más sombrío, reflejo de su tiempo: «Por mi parte, no me impresiona tanto el éxito de nuestra civilización como para creer que nuestro planeta sea el único lugar de este inmenso universo que contiene vida inteligente, o que representamos el máximo desarrollo físico y mental que haya aparecido en este vasto espacio y tiempo».

Las cuestiones que preocupaban a Churchill se encuentran, ochenta años después, en la frontera de la investigación científica. Está en marcha la búsqueda de señales de vida bajo la superficie de Marte. Las simulaciones del clima en Venus indican que pudo haber sido habitable. Los astrónomos están convencidos de que en pocas décadas hallaremos indicios biológicos de vida actual o pasada en la atmósfera de los planetas extrasolares o que, al menos, seremos capaces de acotar su existencia.

Un hallazgo oportuno

El ensayo de Churchill muestra que la ciencia y la tecnología eran para él elementos esenciales del desarrollo social. Con motivo de la creación del Colegio Churchill de la Universidad de Cambridge, en 1958, escribió: «Solo mantendremos nuestra posición y nos ganaremos el sustento si lideramos a la humanidad en el descubrimiento de nuevos mundos de la ciencia y la ingeniería».

Sin embargo, también le preocupaba que la ciencia pudiera operar en un vacío moral, al margen del conocimiento humanista: «Nuestro mundo necesita científicos, pero no necesitamos un mundo de científicos». Creía en la implantación de políticas basadas en valores humanistas que pusieran la ciencia «al servicio del hombre y no al revés». En una conferencia de 1949 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts alertó de que «si no conseguimos eliminar el hambre mundial mediante el recurso a la ciencia moderna, todos seremos responsables».

Churchill promovía la ciencia con entusiasmo, pero no dejaba de situar las cuestiones científicas en el ámbito de los valores humanos. En el panorama político actual, nuestros líderes deberían seguir su ejemplo: nombrar asesores científicos y usarlos bien.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 542, págs. 289-291, 16 de febrero de 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Fifty years hence. Winston Churchill en *The Strand Magazine*, diciembre de 1931.
Churchill College. W. Churchill en *The New Scientist*, vol. 12, n.º 5, 1958.
Churchill. Dirigido por R. Blake y W. R. Louis. Clarendon Press, Oxford 1996.
Churchill: The prophetic statesman. J. C. Humes. Regnery History, 2012.
Where are they? M. Livio y J. Silk en *Physics Today*, vol. 70, n.º 3, 2017.

NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA

por Ramon López de Mántaras



Ramon López de Mántaras es director del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial, del CSIC, en Barcelona, y profesor adjunto de la Universidad de Sídney Occidental.

Ética en la inteligencia artificial

Cada vez más presente en nuestras vidas, la inteligencia artificial ha suscitado un debate sobre su desarrollo y su uso adecuados

El propósito último de la inteligencia artificial, lograr que una máquina posea una inteligencia de tipo general similar a la humana, es uno de los objetivos más ambiciosos que se ha planteado la ciencia. Por su dificultad, es equiparable a otros grandes retos científicos, como explicar el origen de la vida o del universo, o conocer la estructura de la materia. El principal problema al que se enfrenta la inteligencia artificial es la adquisición de conocimientos de sentido común. Este constituye el requisito fundamental para que las máquinas actuales sustituyan la inteligencia artificial especializada por una de tipo general.

Un enfoque interesante para dotar de sentido común a las máquinas es la denominada cognición situada. Consiste en ubicar a las máquinas en entornos reales con el fin de que tengan experiencias que les doten de sentido común mediante aprendizaje basado en el desarrollo mental. La cognición situada requiere que la inteligencia artificial forme parte de un cuerpo. Este resulta determinante para la inteligencia, ya que los sistemas perceptivo y motor definen lo que un agente puede observar y las interacciones que establece con su entorno.

Precisamente las capacidades más complicadas de desarrollar son las que requieren interaccionar con entornos no restringidos: percepción visual, comprensión del lenguaje, razonamiento con sentido común y toma de decisiones a partir de información incompleta. Diseñar sistemas con estas capacidades exige integrar desarrollos en muchas áreas de la inteligencia artificial. En particular, necesitamos lenguajes de representación de conocimientos que codifiquen información sobre numerosos tipos de objetos, situaciones, acciones, así como sobre sus propiedades y las relaciones entre ellos. También nos hacen falta nuevos algoritmos que, partiendo de estas representaciones, puedan razonar y aprender de forma robusta y eficiente sobre prácticamente cualquier tema.



A pesar de todas esas dificultades, las tecnologías basadas en la inteligencia artificial ya están empezado a cambiar nuestras vidas en aspectos como la salud, la seguridad, la productividad o el ocio, y a medio plazo van a tener un gran impacto en la energía, el transporte, la educación y las actividades domésticas. No obstante, por muy inteligentes que lleguen a ser las futuras inteligencias artificiales, siempre serán distintas a las humanas debido a lo determinantes que resultan los cuerpos en los que se ubican. Además, el hecho de ser ajenas a los valores y necesidades humanas nos debería hacer reflexionar sobre aspectos éticos en el desarrollo de la inteligencia artificial y, en particular, sobre la conveniencia de dotar de total autonomía a las máquinas.

Estos aspectos científicos y éticos motivaron un debate el pasado 8 de marzo de 2017, organizado por la fundación Biocat, con el apoyo de la Obra Social la Caixa de Barcelona, y en el que participaron distintos expertos europeos en inteligencia artificial, computación y comunicación, entre otros ámbitos. El debate dio lugar a la «Declaración de Barcelona para un desarrollo y uso adecuados de la inteligencia artificial en Europa».

El documento destaca seis puntos en el desarrollo y el uso de la inteligencia artifical. El primero es la *prudencia*, la necesidad de ser conscientes de que todavía queda por resolver un gran número de obstáculos científicos y técnicos, en particular el problema del sentido común. El segundo hace referencia a la *fiabilidad*, esto es, que los sistemas de inteligencia artificial deben someterse a pruebas que determinen su fiabilidad y seguridad. Otro aspecto es la *rendición de cuentas*: cuando un sistema toma decisiones, las personas afectadas por ellas tienen que poder recibir, en unos términos de lenguaje que entiendan, una explicación de por qué las ha tomado, y tienen que poder cuestionarlas con argumentos razonados. Se apunta también al criterio de *responsabilidad*. Debe quedar claro si la interacción se hace con una persona o con un sistema de inteligencia artificial, y, en el segundo caso, debe poderse localizar e identificar a los responsables de él. Otra cuestión es la *autonomía limitada* de estos sistemas. Se necesita disponer de reglas claras que limiten el comportamiento de los sistemas de inteligencia artificial autónomos para que los encargados de desarrollarlos puedan incorporarlos en sus aplicaciones. Y, por último, debe quedar claro *el papel que desempeña el ser humano*. En casi cualquier área, la capacidad humana todavía supera con creces la inteligencia artificial, especialmente en el tratamiento de casos que no han aparecido en los conjuntos de datos de ejemplo de los que aprenden los sistemas de inteligencia artificial

Todos los interesados en que se siga este código de conducta pueden leer y firmar la declaración en www.iiia.csic.es/barcelonadeclaration.

CONTAMINACIÓN

LA ACCIÓN OCULTA DE LOS DISRUPTORES ENDOCRINOS

Omnipresentes en nuestro entorno, estos contaminantes químicos interfieren en la acción de las hormonas y perjudican nuestra salud. Pero describir con detalle su efecto para poder legislar su uso plantea un reto enorme

Esther Fuentes y Ángel Nadal

EN SÍNTESIS

Como consecuencia de nuestra exposición a los compuestos presentes en objetos de uso cotidiano, como los cosméticos, los productos de limpieza o los envases alimentarios, nuestro organismo presenta niveles variables de contaminantes.

Algunos de esos compuestos alteran la acción de nuestras hormonas, por lo que se los denomina disruptores endocrinos. Actúan a dosis bajas en las diferentes etapas de nuestra vida, en especial durante el desarrollo fetal y la infancia. Debido a que modifican la expresión de genes a través de marcas epigenéticas, pueden perdurar de una generación a la siguiente.

Su acción podría contribuir al aumento de patologías como la diabetes mellitus, la obesidad, la infertilidad y el cáncer. A pesar de que la ciencia ha demostrado sus efectos negativos sobre la salud y el ambiente, las autoridades reguladoras todavía no han definido los criterios para su identificación.



EL PLÁSTICO empleado para fabricar numerosos tipos de envases contiene cantidades muy pequeñas de ciertas sustancias, como ftalatos y bisfenol A, que alteran el funcionamiento de nuestras hormonas.

Esther Fuentes, doctora en ciencias químicas, es profesora de nutrición y bromatología en el Instituto de Bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche, en Alicante, es investigadora del Centro de Investigación Biomédica en Red de Diabetes y Enfermedades Metabólicas asociadas (CIBERDEM).

Ángel Nadal, doctor en ciencias químicas, es catedrático de fisiología en el Instituto de Bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche, en Alicante, e investigador del CIBERDEM. Colabora con el grupo de trabajo de la Sociedad de Endocrinología para que las autoridades europeas incorporen las recomendaciones científicas a la normativa que regula los disruptores endocrinos.





LO LARGO DE NUESTRA VIDA, LAS INTERACCIONES ENTRE NUESTROS genes y el ambiente pueden causarnos enfermedades crónicas no transmisibles, tales como la obesidad, la diabetes mellitus, los cánceres hormonodependientes, el autismo o el síndrome de atención e hiperactividad. Los factores ambientales que afectan a las células de nuestro organismo son múltiples y complejos, y abarcan desde el tipo de alimentación, el estrés, las infecciones y la microbiota (la rica comunidad microbiana que vive asociada a nuestro organismo), hasta los contaminantes químicos.

En la actualidad, la opinión que la palabra *química* despierta entre la población se halla polarizada entre quienes únicamente ven los beneficios que esta ciencia nos ha aportado, sin encontrarle ningún perjuicio, y quienes sienten miedo e intentan evitar todo lo relativo a ella, ya que consideran que lo ajeno a la naturaleza (para ellos *química* es sinónimo de *artificial* o *sintético*) es nocivo para la salud. Por supuesto, pensamos que ninguna de estas dos perspectivas es correcta. La química es una ciencia muy extensa que estudia la composición, la estructura y el comportamiento de la materia. No hay ninguna duda de las enormes ventajas que nos ofrece. Solo hay que pensar en los avances revolucionarios que han experimentado, gracias a ella, campos como la medicina, la agricultura y la industria de la alimentación. Estos y otros logros asociados a la química han contribuido a que nuestra esperanza de vida haya aumentado en el último siglo unos veinte años, además de a mejorar nuestra calidad de vida.

Dicho esto, debemos considerar también los costes que han conllevado tales beneficios. Cualquier químico sabe que el peaje que tenemos que pagar por estos desarrollos es la contaminación. La fabricación de ciertas sustancias, así como su uso y eliminación, acaban afectando a nuestro ambiente y a nuestra salud. Debemos, por tanto, ser conscientes de ello e intentar minimizar en lo posible ese peaje.

En la actualidad existen más de 80.000 compuestos químicos en el mercado, la mayoría de los cuales no ha pasado ninguna prueba antes de ser introducido en él. Aun así, sabemos que un porcentaje de ellos han resultado tóxicos para los humanos y para la fauna silvestre. Los que deben su toxicidad a la alteración que producen en la función de las hormonas se denominan disruptores, o alteradores, endocrinos.

Se ha comprobado que, además de perjudicar nuestra salud, los disruptores endocrinos podrían afectar también a la de nuestros descendientes a lo largo de más de una generación. No obstante, resulta muy difícil establecer una relación de causa-efecto respecto a estas sustancias, debido a que pueden actuar a muy bajas concentraciones y a que el efecto no suele producirse en el mismo momento de la exposición. Todo ello hace que la definición y legislación de los disruptores endocrinos planteen un enorme reto.

UBICUOS Y PERSISTENTES

El Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas de la Organización Mundial de la Salud define un disruptor endocrino como «una sustancia o una mezcla de sustancias exógenas que altera la función o funciones del sistema endocrino y, como consecuencia, causa un efecto adverso en la salud de un organismo, de su progenie o de una población». La Comisión Europea ha catalogado más de 400 sustancias que corresponden a disruptores o posibles disruptores endocrinos.

Tales compuestos suponen un problema global: nuestra exposición a ellos es ubicua porque forman parte de una multitud de productos que utilizamos en nuestra vida diaria. Los hallamos en nuestro hogar, en el trabajo, en la comida, en el agua y en el aire.

Algunos son persistentes, puesto que se concentran en las grasas y permanecen largo tiempo en nuestro organismo. En los períodos en los que las grasas corporales se movilizan, como sucede cuando adelgazamos o durante el embarazo y la lactancia, se liberan a la sangre e interfieren con la acción de las hormonas. Ejemplos de estos compuestos son las dioxinas (productos secundarios que se forman en numerosos procesos industriales), los retardantes de llama (presentes en plásticos, ropa y muebles), los compuestos perfluorados (en detergentes, teflón y algunos envoltorios y envases), los policlorobifenilos (en equipos eléctricos industriales) y los plaguicidas agrícolas organoclorados y organofosforados. Debido a que se acumulan en las grasas animales, su concentración aumenta a medida que se asciende en la cadena trófica. Los humanos, junto con

Dónde están y cómo nos afectan

Los disruptores endocrinos son sustancias contaminantes derivadas de los procesos industriales. Al hallarse presentes en objetos de uso cotidiano, nos hallamos expuestos con frecuencia a ellas. Su efecto sobre nosotros resulta a menudo difícil de identificar, ya que pueden ejercer su acción a muy bajas concentraciones y las consecuencias suelen notarse a largo plazo. Resumimos aquí algunos de los más estudiados. De ellos conocemos el grado al que nos hallamos expuestos, sus modos y mecanismos de acción en el organismo y sus efectos en modelos animales; sabemos también que pueden alterar la salud humana, según indican los estudios epidemiológicos.

Ftalatos. Se emplean como aditivo en múltiples tipos de plásticos, incluido el PVC. Algunos de estos plásticos están prohibidos en la fabricación de productos para niños. También se utilizan en cosméticos, perfumes y colonias. En febrero de 2017, la Unión Europea clasificó cuatro ftalatos como sustancias de alta preocupación para la salud humana, por su acción como disruptores endocrinos. Se relacionan con una mayor incidencia de alteraciones en el aparato reproductor, cánceres dependientes de hormonas y diabetes mellitus.

Compuestos perfluorados. Utilizados como antiadherentes y presentes en detergentes, teflón y algunos envases, son altamente persistentes en el ambiente y se acumulan en la grasa. Se han identificado en la orina del 99 por ciento de los ciudadanos de EE.UU. Interfieren en la función de la hormona tiroidea y las hormonas gonadales, y se asocian con alteraciones en el metabolismo de la glucosa y de los lípidos.

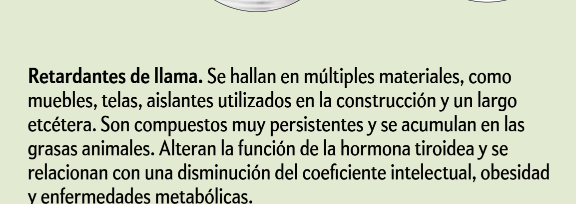




Dioxinas. Formadas como subproductos en procesos industriales, son persistentes y se acumulan en las grasas. Afectan a la producción y calidad del esperma y pueden provocar diabetes mellitus, entre otras enfermedades.

Plaguicidas organofosforados y organoclorados. Ejemplos de ellos son el DDT y sus derivados, y el clorpirifós. Alteran la función de la testosterona y la hormona tiroidea, con consecuencias en el desarrollo de los sistemas reproductor y nervioso. También modifican la señalización de los estrógenos y se han propuesto como alteradores del metabolismo de lípidos y azúcares.

Bisfenol A. Es el componente principal del plástico de policarbonato y está presente en las resinas de epoxi, en el papel térmico y como aditivo en diferentes tipos de plásticos, incluido el PVC. Se ha detectado en la orina del 93 por ciento de los ciudadanos de EE.UU. y se relaciona con un aumento en la incidencia de determinados tipos de cáncer, la alteración del sistema nervioso durante el desarrollo, la diabetes mellitus y la obesidad. En junio de 2017, la Unión Europea clasificó el bisfenol A como sustancia de alta preocupación para la salud humana por su acción como disruptor endocrino.



Retardantes de llama. Se hallan en múltiples materiales, como muebles, telas, aislantes utilizados en la construcción y un largo etcétera. Son compuestos muy persistentes y se acumulan en las grasas animales. Alteran la función de la hormona tiroidea y se relacionan con una disminución del coeficiente intelectual, obesidad y enfermedades metabólicas.



Policlorobifenilos (PCB). Se utilizaron como aislantes para equipos eléctricos industriales comotransformadores,condensadores y termostatos. En los años setenta del siglo pasado se disminuyó su uso y finalmente se prohibieron debido a los efectos adversos que tenían en la salud humana. Son muy persistentes y se acumulan en grasas; todavía se encuentran en un amplio porcentaje de la población. Alteran el desarrollo del sistema nervioso, entre otros efectos.

los grandes mamíferos y los grandes peces, nos situamos al final de dicha cadena, por lo que somos los que más disruptores endocrinos acumulamos.

Hay otros disruptores que no son persistentes, como los ftalatos (aditivo empleado en cosméticos y colonias y en plásticos como el PVC) y el bisfenol A (en las garrafas de agua, las latas de conservas, el material de oficina y juguetes, entre otros muchos productos de uso habitual). Estos compuestos no se acumulan fácilmente en las grasas y se metabolizan y excretan en unas 24 horas. Sin embargo, nuestra exposición a ellos es tan elevada que los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de los EE.UU. los han detectado en la orina de la mayoría de

los ciudadanos de ese país, así como en la leche materna y en el cordón umbilical humanos.

CÓMO ACTÚAN

Los disruptores endocrinos alteran la función de las hormonas. Estas corresponden a moléculas de señalización liberadas por las glándulas endocrinas a la sangre, por la que se desplazan hasta alcanzar los órganos en los que actúan. Allí se unen a unas proteínas que funcionan como receptores hormonales. Estos pueden localizarse en la membrana plasmática y a ellos se fijan las hormonas lipófobas (insolubles en lípidos), como la insulina o la adrenalina.

Otro tipo de receptores hormonales se localiza en el interior celular; a ellos se unen las hormonas lipófilas (solubles en lípidos), como los esteroides y las hormonas tiroideas. En la mayoría de los casos, los disruptores endocrinos actúan al fijarse a estos receptores intracelulares, a los que normalmente nos referimos como receptores nucleares. Los más estudiados son los receptores de estrógenos y de andrógenos (las hormonas responsables del fenotipo femenino y masculino, respectivamente), el receptor gamma activado por proliferadores de peroxisomas (involucrado en el control de la formación de lípidos), y el receptor de hidrocarburos de arilos, que participa en el metabolismo y la expulsión de los xenobióticos (sustancias ajenas al organismo, entre ellos los disruptores endocrinos). Los disruptores también pueden unirse al receptor de glucocorticoides, involucrado en la regulación de genes del desarrollo, del metabolismo y de la respuesta inmunitaria.

Los receptores, cuando se unen a ellos sus ligandos (las hormonas), se dimerizan (se convierten en una molécula formada por dos subunidades idénticas), tras lo cual se desplazan al núcleo, donde reclutan a otras proteínas denominadas correguladoras. El complejo proteico resultante se acopla al ADN en unas secuencias específicas denominadas elementos de respuesta, y regula así la transcripción génica. Dependiendo del ligando que intervenga, se producirán diferentes cambios en la estructura de los receptores nucleares, que reclutarán a distintas proteínas correguladoras y darán lugar a la activación o represión de determinados grupos de genes. Los receptores nucleares son promiscuos en el sentido de que a ellos se unen múltiples ligandos, además de los suyos naturales. Entre otros, fijan disruptores endocrinos que actúan como agonistas (estimulantes) o como antagonistas (inhibidores) del receptor y provocan una regulación incorrecta de la expresión de los genes.

Los disruptores endocrinos no solo tienen la capacidad de alterar las señales celulares al unirse a los receptores nucleares, sino que además pueden generar marcas epigenéticas. Estas corresponden a modificaciones químicas en el genoma debido a la adición o sustracción de grupos metilo o acetilo en el ADN o las histonas (proteínas que, junto con el ADN, forman la cromatina, la fibra de la que están formados los cromosomas). Según las modificaciones que presente la cromatina, se expresarán unos genes con mayor facilidad que otros, lo que cambiará nuestra propensión a padecer determinadas enfermedades.

LA DOSIS NO SIEMPRE HACE EL VENENO

En el campo de la toxicología clásica y la industria química prevalece la máxima de que «la dosis hace el veneno». Esta frase resume la famosa afirmación de Paracelso en el siglo XVI: «Nada es veneno, todo es veneno: la diferencia está en la dosis». Pero este dogma no se cumple en el caso de los disruptores endocrinos.

El hecho de que estos compuestos se aprovechen de los mismos mecanismos moleculares que utilizan las hormonas les confiere propiedades similares a estas y diferentes de las de los compuestos tóxicos clásicos. Es muy importante tener en cuenta ese comportamiento a la hora de realizar una valoración de riesgos. Esto es así porque algunos disruptores endocrinos, igual que las hormonas, actúan a dosis bajas, cercanas a aquellas a las que los humanos estamos expuestos. Otros imitan a las hormonas esteroideas, que muestran relaciones de dosis-respuesta no monotónicas. Ello significa que la pendiente de la curva dosis-efecto cambia de dirección, es decir, puede tener forma de U (o de U invertida): a dosis pequeñas y grandes, el efecto es alto (o bajo), mientras que a dosis intermedias el efecto es bajo (o alto).

Tal comportamiento rompe con el concepto de potencia, definido como el intervalo de dosis dentro del cual una sustancia produce efectos crecientes, un concepto ampliamente utilizado en toxicología para la estimación del riesgo. En los disruptores endocrinos resulta muy difícil, si no imposible, predecir qué concentración no producirá un efecto; como consecuencia, no es posible establecer una dosis umbral por debajo de la cual estemos exentos de riesgo.

Ello genera grandes complicaciones a la hora de reglamentar estas sustancias. En la toxicología con carácter regulador se parte del estudio de dosis altas; si estas no ejercen efecto, se da por supuesto que una dosis baja tampoco lo producirá, lo cual, como hemos visto, no puede aplicarse siempre a los disruptores endocrinos.

Pero, además de la dosis, los efectos que produzcan estos contaminantes van a depender de otras variables, como el tipo de tejido sobre el que actúan, el período de la vida durante el que ocurre la exposición y el género y la edad del individuo afectado, entre otras.

ETAPAS VULNERABLES

Uno de los puntos más relevantes de la ciencia de los disruptores endocrinos es la identificación de los períodos de la vida humana más vulnerables a su exposición, puesto que de ellos depende en gran medida el fenotipo final del organismo expuesto. Conocer tales períodos resulta esencial para poder estimar el riesgo de estos compuestos.

Se sabe que pueden actuar en cualquier momento de nuestra vida, desde el mismo instante de la concepción hasta la vejez. Incluso podrían intervenir antes de la concepción, debido a la exposición a ellos de cualquiera de los dos progenitores. Sin embargo, su acción en la etapa fetal entraña más riesgo que en la edad adulta.

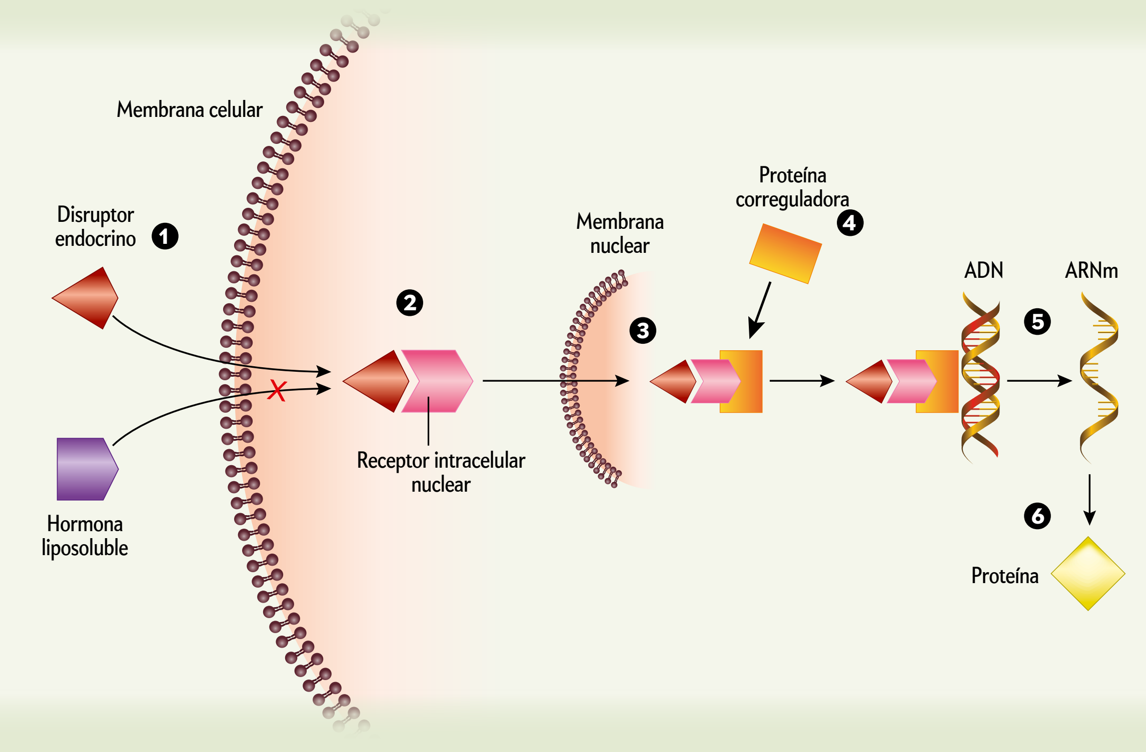
Durante el desarrollo del feto, la lactancia y la infancia, el organismo resulta altamente vulnerable. El feto (y también el lactante) se halla expuesto a los disruptores endocrinos bioacumulables y persistentes que ha ido almacenando la madre a lo largo de la vida, y, además, a otros no persistentes pero muy comunes, a los que todos estamos expuestos de manera cotidiana, incluidas las mujeres embarazadas.

Los disruptores pueden causar durante la organización de los órganos (organogénesis) alteraciones que permanecen a lo largo de la vida del individuo. El mecanismo de acción de los disruptores endocrinos probablemente está muy relacionado con los cambios morfológicos y funcionales característicos de esta etapa. Al unirse a los receptores nucleares, que actúan como factores de transcripción, pueden alterar la expresión de genes importantes del desarrollo fetal y dar lugar a cambios mor-

MECANISMO CELULAR

Así interfieren con las hormonas

Los disruptores endocrinos son sustancias ajenas a nuestro organismo que alteran la función del sistema endocrino, el conjunto de glándulas encargadas de segregar las hormonas. Al presentar una configuración química semejante a las hormonas, los disruptores se acoplan a los receptores celulares de estas y, como consecuencia, ejercen un efecto agonista al de ellas (aumentan su acción), o bien antagonista (inhiben su acción). Abajo se ilustra la interacción de los disruptores con los receptores nucleares, un tipo de receptores que se hallan y actúan en el interior de la célula.



Interacción con los receptores nucleares
En condiciones normales, estos receptores fijan las hormonas liposolubles. Pero, en presencia de un disruptor endocrino ❶, es este el que se acopla al receptor ❷, tras lo cual el conjunto se desplaza al núcleo ❸. Allí se une a ambos una proteína correguladora ❹. El complejo proteico resultante se fija al ADN y modifica la transcripción del ARN mensajero ❺ y la síntesis proteica ❻. Los efectos de esta interacción suelen ser de larga duración.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN LOS AUTORES

fológicos tempranos que predispongan a sufrir determinadas enfermedades en el futuro.

Por otro lado, los disruptores endocrinos pueden modificar las marcas epigenéticas de las células del feto. Estas marcas alteradas se transmiten de una célula a las células hijas a medida que el organismo crece. De este modo, los acontecimientos epigenéticos ocurridos durante el desarrollo fetal se transfieren a la edad adulta. En nuestro laboratorio hemos comprobado que las hembras de ratón gestantes que recibieron bajas dosis de bisfenol A daban lugar a recién nacidos con un mayor número de células β (las que producen la insulina), un hecho que se asociaba al aumento en la expresión de un numeroso grupo de genes relacionados con el ciclo celular. Estos ratones presentaban más adelante una regulación defectuosa de la glucosa y de los lípidos, por lo que tenían una mayor probabilidad de sufrir obesidad y diabetes mellitus de tipo 2. Numerosos estudios han descrito otras alteraciones morfológicas relacionadas con la exposición a disruptores endocrinos durante el desarrollo fetal, como las anomalías en el desarrollo de la glándula mamaria, la próstata y el sistema nervioso, entre otros. Como ya hemos dicho, las alteraciones no afectan solo al feto, sino también a la madre. De este modo, cuando en nuestros experimentos tratábamos las hembras de ratón gestantes con bisfenol A, estas sufrían una disminución en el número de células β siete meses después del parto. Además, segregaban menos insulina en respuesta a la ingestión de glucosa y mostraban resistencia a la insulina e intolerancia a la glucosa.

Pero la importancia del período gestacional como ventana de vulnerabilidad no resta importancia a la exposición que se experimenta a lo largo la vida. En la población adulta, los disruptores endocrinos producen efectos en la mayoría de los casos reversibles, pero cabe prestarles especial atención cuando la exposición es continuada y prolongada.

Un aspecto que despierta interés científico, pero también preocupación, son los datos que indican que los disruptores endocrinos no solo afectan a un individuo y su progenie, sino también a las siguientes generaciones, a pesar de no haber estado sometidas a la influencia directa de esas sustancias. En 2005, el grupo de Michael Skinner, de la Universidad Estatal

de Washington, describió en la revista *Science* que la exposición al fungicida vinclozolina (empleado en agricultura) producía marcas epigenéticas que podían transmitirse hasta la cuarta generación [*véase* «Un nuevo tipo de herencia», por Michael Skinner; Investigación y Ciencia, octubre de 2014].

En la actualidad, se ha demostrado el efecto transgeneracional de los disruptores endocrinos en modelos animales. Mientras que el laboratorio de Skinner ha observado alteraciones en el aparato reproductor y otros órganos, Raquel Chamorro-García y Bruce Blumberg, de la Universidad de California en Irvine, han detectado anomalías en el metabolismo. Aunque estamos a la espera de obtener datos en humanos, estos resultados nos estarían indicando que una parte de la mayor incidencia en los últimos treinta años de las enfermedades no transmisibles podría atribuirse a una exposición de nuestros bisabuelos y tatarabuelos a determinados disruptores endocrinos en el pasado. Así lo sugirió el grupo de Skinner respecto al DDT (difenil tricloroetano), un insecticida que se empleó en los años cuarenta y cincuenta del siglo pasado para combatir los mosquitos transmisores de la malaria y de otras infecciones, y para hacer frente a las plagas agrícolas. Esas observaciones hacen sospechar también que la convivencia en nuestros días con estas sustancias podría tener consecuencias en nuestros biznietos y tataranietos.

CÓMO SE REGULA SU USO

Una legislación provisional

La regulación de los disruptores endocrinos todavía se está debatiendo en el Parlamento Europeo. De modo provisional, la legislación sobre estas sustancias se basa en una clasificación más general, el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de clasificación y etiquetado de productos químicos, un sistema internacional redactado bajo los auspicios de las Naciones Unidas. El Reglamento n.º 1272/2008 sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas transfiere el esquema del SGA a la legislación europea. En él se describen cuatro grupos de sustancias:

Carcinógenas. En este grupo se establecen dos categorías: la 1, que incluye las sustancias con un efecto carcinógeno demostrado en humanos, o a las que se les supone ese efecto porque existen pruebas sólidas en animales; y la 2, que corresponde a las sustancias supuestamente carcinógenas porque hay datos en animales o humanos que lo indican, pero no son suficientes para que estas se incluyan en la categoría 1.

Tóxicas para el desarrollo y el sistema reproductor. Son las sustancias que producen efectos adversos durante el embarazo o como resultado de la exposición de los progenitores. El efecto final puede ocurrir a lo largo de toda la vida del organismo. Se divide en dos categorías (1 y 2), que siguen los criterios de los carcinógenos.

Dañinas y tóxicas. Aquellas que ejercen una toxicidad específica sobre un órgano e impiden su función correcta. Existen dos categorías que dependen de la potencia de la acción tóxica.

Tóxicas para el ambiente. Sustancias que se consideran peligrosas para el medio acuático.

Los criterios actuales definen que una sustancia es un disruptor endocrino si puede clasificarse como un carcinógeno de categoría 2 o como un compuesto tóxico para el desarrollo y la reproducción de categoría 2, y, además, surte efectos tóxicos sobre los órganos endocrinos.

ENFERMEDADES CON LAS QUE SE RELACIONAN

Demostrar una relación de causa-efecto respecto a la acción de los disruptores endocrinos en humanos no es tarea fácil. Ello es debido, en gran parte, a que las consecuencias de una exposición durante el embarazo pueden manifestarse en la descendencia años más tarde, generalmente en la edad adulta. Además, puede que los disruptores endocrinos no sean la única causa de una enfermedad que se esté examinando. La causalidad se establece, principalmente, mediante la valoración de los daños en modelos celulares y animales, así como mediante estudios epidemiológicos en los que se evalúan las enfermedades que provocan en humanos.

Algunos de los estudios epidemiológicos parten del conocimiento de una liberación en el pasado de disruptores endocrinos a causa de algún accidente ambiental o laboral, o bien del consumo, en su tiempo, de ciertos medicamentos. Tal es el caso del dietilestilbestrol (DES), una sustancia agonista de los receptores de estrógenos que fue recetada a las mujeres gestantes inicialmente como antiabortivo y, más tarde, simplemente como reforzante durante el embarazo. Este fármaco no se sometió a pruebas con animales a largo plazo y se comercializó tan solo unos pocos meses después de su síntesis. Se calcula que en EE.UU. fueron tratadas con DES un millón y medio de mujeres gestantes; en España se comercializó como Protectona en los años cincuenta y sesenta. Desgraciadamente, no solo se descubrió que el fármaco no ejercía ningún efecto beneficioso para el embarazo; entre finales de los sesenta y principios de los setenta se demostró también que las hijas de las mujeres tratadas con él mostraban una elevada probabilidad de padecer distintos tipos de cáncer del aparato reproductor. El ejemplo del DES ha puesto de manifiesto que los compuestos estrogénicos pueden producir cáncer en humanos y, además, la señalización alterada de los estrógenos durante el embarazo puede tener consecuencias trágicas años más tarde, en la descendencia.

Otro ejemplo lo ofrece el accidente ocurrido en 1976 en Seveso, en Italia. A causa de una explosión en una fábrica de plaguicidas, se produjo la liberación al ambiente de la dioxina TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina), un compuesto extremadamente tóxico y, a la vez, un conocido disruptor endocrino. La población expuesta manifestó tiempo después trastornos en los sistemas inmunitario, cardiovascular y nervioso. Los niños nacidos de las mujeres embarazadas durante el accidente sufrieron hipotiroidismo y, como consecuencia de este, presentaron problemas motores y retraso mental. El TCDD era también uno de los subproductos de la fabricación del agente naranja, un herbicida empleado en la guerra de Vietnam por el ejército de los EE.UU. y que ha causado un aumento de cánceres, diabetes y problemas cardiovasculares entre la población expuesta y su descendencia.

Existen también abundantes datos publicados en estudios epidemiológicos que asocian la exposición habitual a disruptores endocrinos y determinadas patologías. El número de artículos sobre estos estudios se ha disparado durante los últimos años. Según el último documento de la Sociedad de Endocrinología de EE.UU. (la sociedad de endocrinología con mayor

número de miembros, pertenecientes a todo el mundo, y, sin duda, una de las más influyentes) sobre el estado actual de la ciencia de los disruptores endocrinos, publicado en la revista *Endocrine Reviews* y en el que participó uno de los autores (Nadal), existen datos suficientes para relacionar la exposición a los disruptores endocrinos con trastornos del aparato reproductor, cánceres dependientes de hormonas, anomalías en la señalización de la hormona tiroidea, alteraciones neuroendocrinas y anomalías en el desarrollo del sistema nervioso. Y resultan preocupantes los datos relativos al aumento de las enfermedades metabólicas, entre ellas la obesidad, la diabetes mellitus y las enfermedades cardiovasculares.

Además de perjudicar nuestra salud, la mayor incidencia de estas patologías grava notablemente nuestra economía. Estudios liderados por Leonardo Trasande, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York, han estimado que en la Unión Europea el coste en salud atribuible a los disruptores endocrinos asciende a unos 160.000 millones de euros anuales.

DIFÍCILES DE LEGISLAR

La inquietud que despierta la contaminación química por sus posibles repercusiones sobre la salud y el ambiente es relativamente reciente. Comienza a principios de los años sesenta, con la publicación por parte de Rachel Carlson de *Primavera silenciosa*, un superventas que describe los efectos deletéreos de los plaguicidas, entre ellos el DDT. La influencia de este libro contribuyó a la prohibición del DDT y a la creación en 1970 de la Agencia de Protección Ambiental en EE.UU. En la Unión Europea, la Agencia Europea del Medio Ambiente se crea en los años noventa, y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), en 2002.

Para evaluar si una sustancia o una mezcla de ellas tienen el potencial de alterar el sistema endocrino deberían utilizarse unos criterios científicos específicos. Lamentablemente, estos criterios todavía no han sido definidos por las autoridades europeas, por lo que, de modo provisional, la EFSA aplica unos «criterios interinos» basados en dos reglamentos del Parlamento Europeo: el Reglamento n.º 1107/2009, relativo a la comercialización de productos fitosanitarios, y el Reglamento n.º 528/2012, relativo a la comercialización y uso de biocidas (sustancias sintéticas destinadas a destruir o controlar la proliferación de microorganismos, como hongos y bacterias) que puedan ser perjudiciales para la población humana, los animales o el ambiente. En resumidas cuentas, estos criterios consideran que una sustancia es o puede ser un alterador endocrino si puede clasificarse como un carcinógeno de categoría 2 o como un compuesto tóxico para el desarrollo y la reproducción de categoría 2, y, además, surte efectos tóxicos sobre los órganos endocrinos (*véase el recuadro* «Una legislación provisional»).

En los últimos años, el interés por los disruptores endocrinos ha crecido de modo notable en el Parlamento Europeo. Algunos Estados Miembros de la UE (como Suecia, Francia, Dinamarca y los Países Bajos), así como varias sociedades científicas y organizaciones no gubernamentales, han reclamado repetidamente que se establezcan unos criterios de identificación y actuación que protejan al ciudadano de la exposición a estos compuestos. Mientras escribimos este artículo, la Comisión Europea está trabajando en el establecimiento de estos criterios para los compuestos utilizados como biocidas y plaguicidas, lo que representa un primer paso antes de aplicar estos criterios de identificación a otros compuestos empleados en otros sectores.

Si tenemos en cuenta el último borrador propuesto por la Comisión Europea el 28 de febrero de 2017 para productos biocidas y fitosanitarios, la identificación de los disruptores endocrinos será poco efectiva para proteger a los ciudadanos europeos, pues harán falta más pruebas que demuestren que un compuesto químico es un disruptor endocrino que las que se necesitan hoy para identificar los compuestos cancerígenos, mutagénicos y los que resultan tóxicos para la reproducción. De momento, la Comisión Europea ha decidido utilizar unos criterios donde se incluye una única categoría para clasificar los disruptores endocrinos, equivalente a la categoría 1 de los carcinógenos. Es decir, se requerirá demostrar que un compuesto sospechoso de alterar el sistema endocrino tiene consecuencias adversas para la salud humana. Algo que, como reflejamos a lo largo del artículo, es un proceso muy difícil y costoso en términos de tiempo y dinero.

Las sociedades de endocrinología más influyentes del mundo, a saber, la Sociedad de Endocrinología de EE.UU., la Sociedad Europea de Endocrinología y la Sociedad Europea de Endocrinología Pediátrica, han solicitado en una carta pública a los Ministros de los Estados Miembros de la Unión Europea que los criterios de identificación de los disruptores endocrinos se adhieran a una definición basada en la ciencia, que incluya al menos dos categorías: una para disruptores endocrinos y otra para compuestos catalogados como posibles disruptores endocrinos pero para los que se necesitaría más información antes de tomar una determinación.

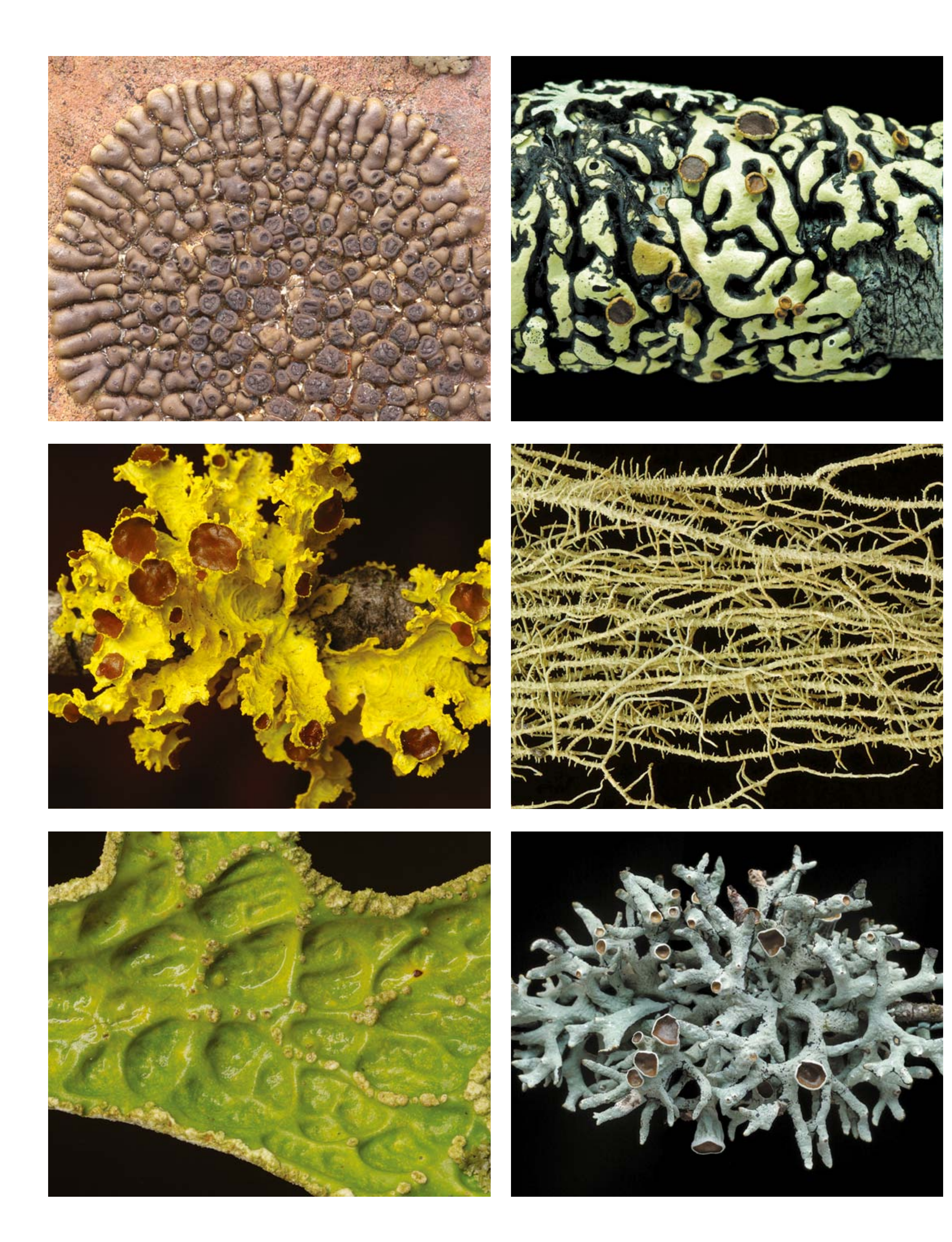
Unos criterios de identificación tan exigentes como los que se plantean en el último borrador, que prácticamente hagan imposible la clasificación de cualquier sustancia como disruptor endocrino, tendrán, aparentemente, un coste económico menor, pero un perjuicio mayor para nuestra salud y también un coste económico considerable para los sistemas nacionales de salud. Por el contrario, unos criterios menos estrictos, que admitieran una segunda categoría, mejorarían la salud pública y ahorrarían costes a la seguridad social. Además, supondrían una oportunidad para incentivar la generación de nuevos compuestos químicos sostenibles y métodos biológicos, que también nos reportarían beneficios económicos. Esperemos que la Comisión Europea tome las decisiones adecuadas basándose en todos los datos científicos existentes, y aproveche la oportunidad de regular la exposición a los disruptores endocrinos de la manera más beneficiosa para la salud y el ambiente. IyC

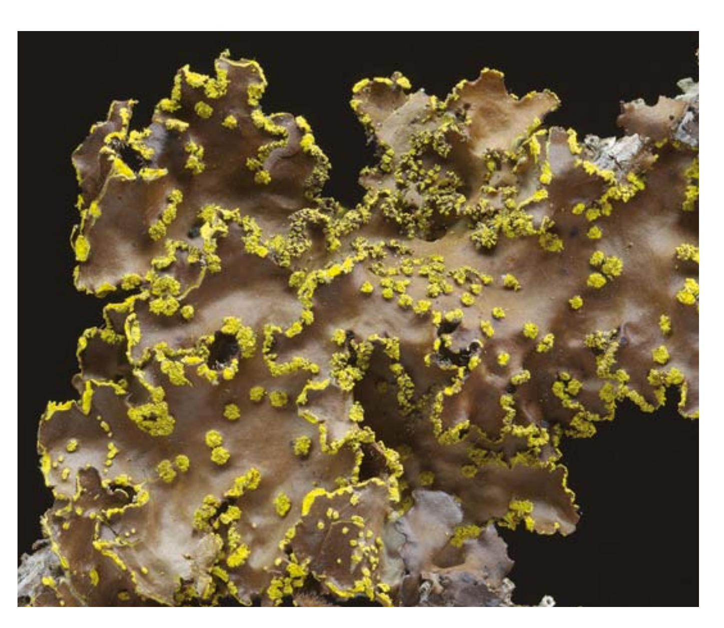
PARA SABER MÁS

Green chemistry, theory and practice. Paul T. Anastas y John C. Warner. Oxford University Press, Oxford y Nueva York, 2000.
Endocrine disruptors in the etiology of type 2 diabetes mellitus. Paloma Alonso-Magdalena et al. en *Nature Reviews Endocrinology*, vol. 7, págs. 346-353, 2011.
Hormones and endocrine-disrupting chemicals: Low-dose effects and nonmonotonic dose responses. Laura N. Vandenberg et al. en *Endocrine Reviews*, vol. 33, n.º 3, págs. 378-455, 2012.
EDC-2: The endocrine society's second scientific statement on endocrine-disrupting chemicals. Andrea C. Gore et al. en *Endocrine Reviews*, vol. 36, n.º 6: E1-E150, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Riesgos del bisfenol A. Heather Patisaul en *IyC*, abril de 2010.
Exposición prenatal a contaminantes y salud infantil. Mireia Gascón Merlos en *IyC*, diciembre de 2014.
Las secuelas del agente naranja. Charles Schmidt en *IyC*, agosto de 2016.
Aguas contaminadas. Charles Schmidt en *IyC*, junio de 2017.



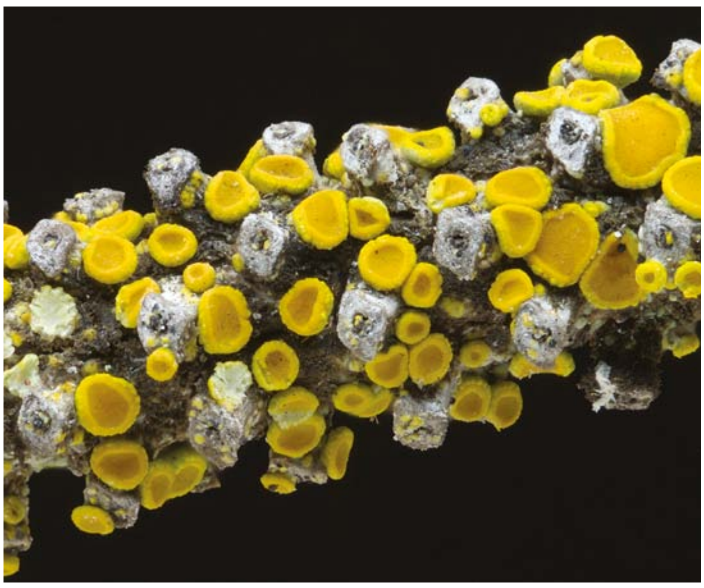



BIOLOGÍA

Una nueva visión sobre los líquenes

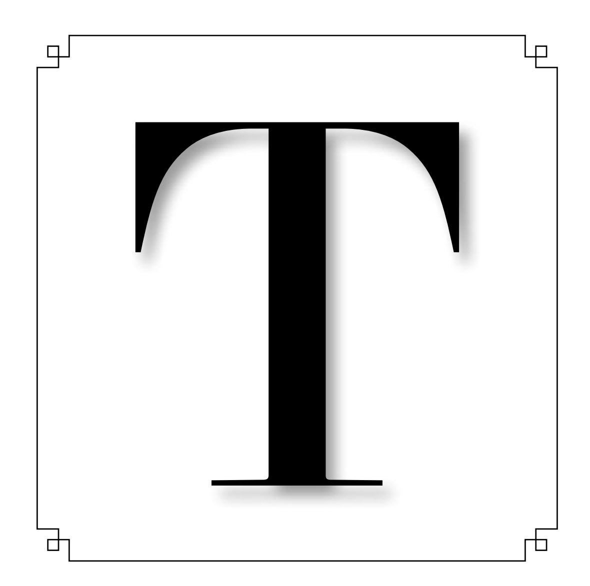
Un naturalista autodidacta descubre simbiosis ocultas en las tierras vírgenes de la Columbia Británica y contribuye a refutar 150 años de saber científico arraigado

Erica Gies



Erica Gies escribe sobre ciencia y ambiente. Sus trabajos se publican en *The New York Times*, *The Guardian*, *The Economist*, *Ensia* y *National Geographic*, entre otros.



Trevor Goward me deja encabezar la marcha, de modo que caminamos a través del bosque mixto a mi ritmo. Ello supone un freno para su espigada figura de 1,95 metros y sus largas zancadas. Transitamos por trochas apenas perceptibles, abiertas por el paso de osos y ciervos en terrenos de su propiedad, aledaños al Parque Provincial Wells Gray, en la Columbia Británica. Su intención no es otra que la de cederme espacio para mis observaciones, mi modo innato de apreciar el entorno: ¿qué atrae mi atención? ¿en qué me fijo? ¿y en qué no? Me detengo ante una pequeña excrecencia blanquecina-verdosa que crece sobre la corteza de un álamo. «¡Observa!», exclama emocionado, invitándome a examinar un ejemplar de *Platismatia glauca* a través de una lupa. De inmediato me sumerjo en otro mundo, lleno de diminutas ramificaciones tachonadas por puntitos negros en el interior de cavidades salpicadas de un polvo finísimo.

En esta fresca jornada otoñal, Goward, con el cabello cano y despeinado, viste una camisa de franela a cuadros. De su cuello cuelga una lupa de relojero sujeta por un cordel, mientras una hembra de pastor australiano llamada Purple trota a su lado. Se diría que es un amante de la montaña más que un científico, un naturalista en la tradición de Charles Darwin o Henry David Thoreau. Su predilección son los líquenes, esas excrecencias que semejan musgos en miniatura o costras coloreadas que crecen por doquier incrustadas en los árboles y en las rocas. No se separa de este lugar, en el que ha transcurrido la mayor parte de su vida adulta después de pasar la niñez y la juventud en una ciudad ubicada al sur del parque. A sus 64 años, lo abandona solo en contadas ocasiones. «Se ha convertido en el centro de mi espiritualidad», me confiesa. No es difícil adivinar por qué. La mayor parte del parque carece de pistas de acceso para los vehículos rodados y rara vez es frecuentada por personas. Los más de 5200 kilómetros cuadrados de Wells Gray están salpicados de volcanes y glaciares; sus valles fluviales, las montañas escarpadas, los prados alpinos y los rincones empapados del agua pulverizada por las cascadas albergan una rica biodiversidad. «Me di cuenta de que los líquenes de este lugar son realmente especiales», por estar entre los más diversos del planeta, sonríe satisfecho. La variedad de tipos se cuenta por cientos y la lista no cesa de crecer. Su esmerada atención a este lugar, como la que dedica el conservacionista Aldo Leopold a su querido condado de Sauk, en Wisconsin, le permite ver vínculos que pasan inadvertidos a los demás.

El primer encuentro de Goward con la liquenología tuvo lugar mientras se formaba a sí mismo en las diversas familias de seres vivos. «Me propuse aprender cada año todo lo que pudiera sobre un grupo. Primero escogí las aves, luego las plantas y luego las setas y los insectos.» Cuando llegó el turno de los líquenes, quedó entusiasmado. Desde entonces, pese a su condición de autodidacta, se ha convertido en el experto de la Columbia Británica central a quien muchos consultan, entre ellos climatólogos, geólogos que buscan yacimientos auríferos o biólogos que estudian el caribú. Varias especies de líquenes llevan su nombre. Ha publicado tres guías taxonómicas sobre este grupo de organismos y se ha ganado el puesto de miembro asociado del departamento de botánica en la universidad de esa provincia canadiense.

Aun así, Goward es visto como un disidente en los círculos científicos. Sus revolucionarios experimentos mentales acerca

EN SÍNTESIS

Trevor Goward, autodidacta sin titulación en ciencias, ha contribuido a volver del revés el campo de la liquenología y quizá de la biología entera gracias a su atenta observación de la naturaleza.

De sus ideas, elogiadas por algunos y desdeñadas por otros, se desprende que la biología, y la ciencia en general, podrían estar apartándose demasiado del mundo natural, que los disidentes pueden ser brillantes y que las formas de vida más perdurables podrían ser las redes, no los individuos.

PÁGINAS ANTERIORES: TIM WHEELER

de los líquenes, publicados en 12 sugerentes ensayos que cualquiera puede leer en su página web, Ways of Enlichenment (un juego de palabras entre *lichen* y *enlightenment*, «liquen» e «iluminación» en inglés, respectivamente), han sido el blanco de burlas y risas, en gran medida ignoradas por el grueso de los investigadores porque no cuenta con ninguna titulación científica y muchas de sus ideas no están respaldadas por datos rigurosos. Con todo, las sagaces observaciones y las profundas reflexiones de Goward siguen los pasos de Darwin y de Thoreau, cuyas obras constituyeron el fundamento de las teorías de la evolución y la ecología, mucho más que la ciencia de laboratorio. Los que están dispuestos a tomar en cuenta sus puntos de vista aseguran que se trata de ideas inspiradoras acerca de los líquenes, de la biología y de la vida en general. Su amigo íntimo Toby Spribille, liquenólogo de la Universidad de Alberta y coautor en algunos de sus trabajos, afirma que los ensayos de Goward contienen muchas perlas preciosas: «Sinceramente, creo que son brillantes».



TREVOR GOWARD examina un ejemplar de *Platismatia glauca* sobre un álamo. Sus agudas observaciones sobre la naturaleza han alborotado el ámbito de la biología, a semejanza de predecesores ilustres como Charles Darwin o Henry David Thoreau.

ERICA GIES

En el bosque, Goward rebosa de un gozo entusiasta pero sosegado. Cuando nos detenemos, se apoya sobre su recio bastón de montaña y pronuncia largos soliloquios sobre el modo en que interaccionan los elementos del ecosistema. Saber interpretar la flora liquénica de un lugar le permite deducir aspectos sobre la composición química del suelo, el régimen de lluvias y los nutrientes vegetales. Me enseña uno que crece sobre una tsuga (árbol conocido también como falso abeto), una situación atípica puesto que la corteza de las coníferas suele ser demasiado ácida para sustentar ese tipo de liquen. ¿Por qué, entonces, crece allí? En un artículo que vio la luz en 2000, Goward y André Arsenault, ecólogo del Servicio Forestal Canadiense, descubrieron que la respuesta radicaba en un maduro álamo temblón cercano. El agua que gotea de sus ramas actúa como un lixiviado que, al caer sobre la corteza de la conífera, mitiga su acidez y permite prosperar a ese liquen epífito. Llamaron a ese fenómeno efecto de goteo.

Goward aprende de cada forma de vida, incluso de Purple, que nos espera con paciencia cuando deja a un lado sus propias observaciones, como fijarse en las heces de una marta americana o en el parloteo de una ardilla roja. Aunque Goward domina el francés y el latín, y se defiende con el alemán y el sueco, destaca que la mayoría de los días habla «liquenés» y un poco de «perruno». Afirma que aprende de la manera de ver de su mascota. Puede parecer una excentricidad, pero respeta los conocimientos de los pueblos indígenas de la región y el aprendizaje a través de la observación de la fauna es una tradición que se pierde en el pasado.

La ciencia moderna tiende a ignorar a los extravagantes. Pero la ciencia reduccionista no es el único modo de conocimiento. Los naturalistas fueron los predecesores de la ciencia. El ser humano vivió antaño mucho más cercano a la tierra y era un agudo observador dotado de grandes conocimientos sobre los lazos que unen a los seres vivos. Hoy la biología tiende a centrar su atención en las moléculas, y la incapacidad para mirar por encima del instrumental del laboratorio y observar cómo encajan las piezas en el mundo natural a veces mina el descubrimiento. La mirada clínica hace que se pierdan de vista las grandes conexiones de conjunto, como la creciente percepción de que las redes pueden ser una forma de vida más perdurable que los individuos. Sin ir más lejos, fue una idea de Goward la que inspiró el proyecto de laboratorio de Spribille mientras este cursaba una estancia de posdoctorado en la Universidad de Montana. Esa labor se saldó con un avance notorio: un artículo de portada en la revista *Science* en julio de 2016 que sacudió los círculos anquilosados de la liquenología. El descubrimiento ha puesto en tela de juicio la naturaleza misma de la simbiosis liquénica y, además, arroja luz renovada sobre el funcionamiento de las simbiosis, la acción de la selección natural e incluso la mismísima definición de ser vivo.

Los líquenes son ubicuos a la par que fascinantes. Con tal vez más de 500 millones de antigüedad, habitan en los seis continentes y prosperan en algunos de los lugares más inhóspitos del planeta. Han logrado sobrevivir incluso un año y medio en el espacio, expuestos a los rayos cósmicos, la radiación ultravioleta y el vacío. Las 14.000 especies existentes adoptan gran variedad de formas: rosetas planas incrustadas en las rocas, hojas festoneadas enclavadas entre musgos, costras aferradas tenazmente a la corteza de los árboles, marañas de hebras colgantes en las ramas o trompetillas diminutas rematadas de rojo.

Durante siglos creímos que eran plantas (y después hongos). Hasta que, en los años sesenta del siglo xix, el botánico suizo Simon Schwendener descubrió que eran una asociación entre un hongo (un ser vivo clasificado en su propio reino porque, a diferencia de las plantas, es incapaz de sintetizar su alimento) y un alga, un organismo que se nutre por medio de la fotosíntesis pero carece de las raíces y los tallos de toda planta. El primero aporta sostén y protección, y la segunda suministra a este el

alimento que precisa con su actividad fotosintética. (Después se descubrió que en ciertos líquenes, una cianobacteria aporta los nutrientes, y que un puñado de especies contienen un alga y una cianobacteria, además del hongo.) El descubrimiento de Schwendener, recibido primero con escepticismo por la comunidad científica, acabó por quedar plasmado en los libros escolares de ciencias naturales como el ejemplo arquetípico de la simbiosis, una relación mutuamente beneficiosa entre seres vivos. Desde entonces, se han hallado más ejemplos en la naturaleza, como los miles de millones de microbios que colonizan el cuerpo humano.

Durante los últimos doscientos años, la ciencia ha contemplado mayoritariamente las moléculas, las células y las especies vivientes como individuos. La simbiosis desafía esa idea. Spribille explica: «En el corazón del liquen, las células del alga y las del hongo pueden mantener una relación individual, pero juntas conforman el liquen que el caribú devora como un todo apetitoso». La selección natural concurre simultáneamente en ambas escalas. Al igual que la luz es onda y partícula a la vez, el hongo y el alga son al mismo tiempo individuos y partes de un todo. La visión reduccionista de la ciencia ha hecho casi imposible entender plenamente la simbiosis, asegura Spribille. «Se suponía que la ecología era la ciencia de los procesos naturales y de la síntesis, pero sus cimientos se están poniendo a prueba bajo el peso de la individualidad.»

En julio de 2016, Spribille y otros autores dieron un paso principal en la comprensión de los líquenes. Publicaron su gran hallazgo en *Science*, a saber, que muchos de ellos albergan un segundo hongo.

En el corazón de su estudio se halla un par de líquenes que llamaron la atención de Spribille gracias a Goward: el filiforme *Bryoria fremontii*, cuyo aspecto recuerda a una barba parda y forma parte de la alimentación de los indígenas del noroeste de Norteamérica, y el afín *Bryoria tortuosa*, habitualmente amarillo-verdoso, pero tóxico por su elevado contenido en ácido vulpínico. Ambos constituyen un enigma fascinante. A pesar de sus diferencias, un análisis genético publicado en 2009 por Saara Velmala, de la Universidad de Helsinki, y otros autores, entre ellos Goward, demostró que ambos contenían el mismo hongo y la misma alga. Spribille recuerda cómo este hallazgo les desconcertaba a los dos: «[Goward] no dejaba de darle vueltas a cómo demonios esos dos líquenes (uno de ellos venenoso) podían ser idénticos. Y me contagié de esa obsesión».

Aparte de su dispar aspecto y contenido de ácido vulpínico, Goward observó que los líquenes presentaban también características ecológicas ligeramente distintas. A pesar de que a veces crecen en los mismos lugares, *B. tortuosa* se encuentra solo en los márgenes de la amplia área de distribución de *B. fremontii* que permanecen más secos durante el verano. En 2009 propuso que los líquenes no se forman en virtud de la morfología del hongo, sino a partir de una serie de decisiones tomadas durante la danza que ambos, hongo y alga, se marcan en el momento de establecer la simbiosis. Un liquen puede parecer distinto de otro y, aun así, contener los mismos simbiontes, porque estos ejecutan diferentes giros durante el desarrollo. Goward planteó que las divergencias entre las dos especies de *Bryoria* podrían radicar en su relación con una tercera forma de vida: una bacteria.

Después de un lustro de trabajos en el laboratorio, Spribille y sus colaboradores descubrieron que las dos especies acogían, en efecto, un tercer miembro. Pero no era una bacteria, sino otro hongo: un basidiomiceto con aspecto de levadura. El liquen venenoso contiene este tercer simbionte en mucho mayor número que el comestible. El equipo demostró asimismo que no es un intruso, sino que ha evolucionado en paralelo con los otros simbiontes durante más de 200 millones de años. Al extender su búsqueda a especies de todo el planeta, descubrieron la levadura en otros 52 grupos de líquenes (géneros). El hallazgo amplió drásticamente el conocimiento de los líquenes y ha abierto la puerta a nuevas ideas. «Solo ahora estamos comenzando a apreciar que los líquenes han logrado una hazaña excepcional en la evolución. Se han convertido en un gran organismo pluricelular compuesto por entero de seres microscópicos y, lo más sorprendente, sin contar con ninguna estructura de soporte», afirma Spribille. «Consigue asociarse y perpetuarse a sí mismo, generación tras generación de simbiontes.»



EL EXAMEN MINUCIOSO ha revelado que *Bryoria fremontii* no es una mera asociación entre un hongo y un alga, como se pensaba desde hacía tiempo; en él interviene también una levadura.

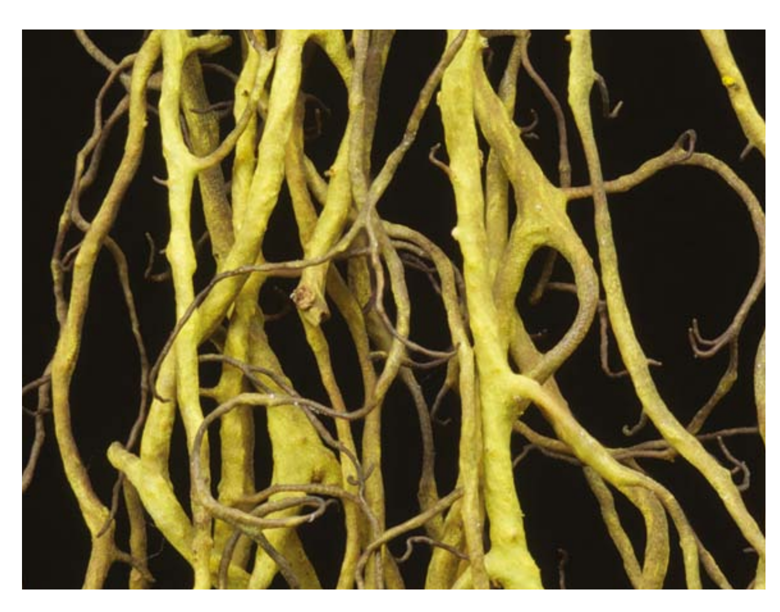
TIM WHEELER

Goward se interesó por primera vez por *B. fremontii* y *B. tortuosa* a raíz de la lectura de un artículo de la etnobotánica Nancy Turner publicado en 1977. La autora destacaba la importancia del primero para los indígenas de la región y afirmaba que las ancianas nativas reconocían sin dificultad la forma comestible de la que no lo era. Y es que si bien las dos especies lucen colores distintos y una morfología ligeramente diferente, también pueden mostrar un aspecto engañosamente similar. Las ancianas se servían de indicios como la ubicación, el color y el tipo de líquenes vecinos para distinguirlas. Cuando Stuart Crawford, etnobotánico y a la sazón amigo de Goward, le mostraba pedazos de ambas a la hoy difunta Mary Thomas, anciana y conservacionista de la reserva nativa de Neskonlith, esta adivinaba siempre la que era comestible.

La sabiduría popular no siempre se aviene con el razonamiento científico, advierte Crawford, pero el resultado, basado en la observación, es correcto. Los lugareños le dijeron a

Crawford que esperaban a que *B. fremontii* «madurara» en el árbol. De hecho, los líquenes no maduran como las frutas o las verduras, pero su color más oscuro y su hábito de crecimiento sobre los árboles permiten a la persona avezada distinguirlo de su gemelo venenoso. Este tipo de conocimientos sobre *Bryoria* habrían añadido un matiz interesante al artículo de *Science*, opina Spribille, pero «excedían el límite de palabras impuesto».

Tres meses después de que el artículo viera la luz, Crawford, que conoce a Spribille por mediación de Goward, volvió para contarle algo sorprendente. Llevaba años recopilando escritos que se remontaban hasta el antiguo Egipto y el Oriente Próximo bíblico, pero también del México moderno, la Rusia medieval, o hasta de un recetario europeo de cocina de la década de los cincuenta del siglo xx, todos de personas que usaban líquenes como ingrediente para elaborar pan o bebidas alcohólicas. En ciertos casos, los empleaban a sabiendas de que actuarían como levadura o como un acelerador de la fermentación. Crawford reparó en que, en cierta medida, la gente sabía que contenían levadura o que actuaban como tal. Durante sus estudios de grado en Victoria, en la Columbia Británica, compartió su idea con un cervecero local, que le propuso: «Si descubres la receta, elaboraré un lote de cerveza con ella».



BRYORIA TORTUOSA **está formado por el mismo hongo y la misma alga que el liquen comestible *B. fremontii*. Pero, a diferencia de este, alberga un número mucho mayor de levaduras, que lo convierten en tóxico.**

TIM WHEELER

La apertura de miras de Spribille a las ideas heterodoxas de Goward tal vez sea un reflejo del duro camino que ha tenido que recorrer en su carrera científica. Criado en el seno de una familia cristiana fundamentalista del noroeste de Montana, sus padres lo sacaron de la escuela al acabar el cuarto curso para protegerle de «las influencias del mundo». Spribille me cuenta esto a través de Skype desde Austria, donde es noche cerrada y su mujer y su pequeña duermen. Sus gafas rectangulares enmarcan unos ojos azules que cierra a menudo mientras conversa, como si hablar conmigo le incomodara un poco.

Las vicisitudes no pudieron refrenar su curiosidad intelectual. Intrigado por los seres vivos que veía en el campo y en el bosque, buscó respuestas en los biólogos de la sede local del Servicio Forestal de EE.UU., y estos acabaron recomendándole para un trabajo de catalogación de plantas vasculares, con lo que pudo comenzar a llamar a profesores e investigadores para plantear sus preguntas candentes. Goward estaba en la agenda de Spribille. «Charló conmigo durante dos horas y media», recuerda con afecto. Eso sucedió hace más de veinte años. Desde entonces, han escrito juntos varios artículos y Spribille comenta que aún no han agotado los temas de conversación. No mucho después, Goward le confesó que abrigaba ideas que pondrían patas arriba la liquenología. Spribille le contestó que estaba desvariando, pero que quería escucharlas igualmente.

A la larga, Spribille vio que precisaba adquirir educación formal. Aprobó el examen de equiparación con la educación secundaria y le surgió la oportunidad de estudiar en una facultad de Alemania. Más tarde obtuvo la tesis doctoral en liquenología por la Universidad de Graz y el pasado marzo ocupó su flamante puesto como profesor de ecología y evolución de la simbiosis en la Universidad de Alberta. Durante su posdoctorado en la Universidad de Montana conoció a John McCutcheon, uno de los autores del artículo de *Science* y responsable del laboratorio donde se hizo el trabajo. McCutcheon atribuye el gran descubrimiento a los avances técnicos que han permitido descubrir la minúscula levadura y al trabajo conjunto de diversos especialistas. Pero también ha sido crucial, matiza, la capacidad de Spribille de mirar más allá de lo que se tiene por cierto. La tendencia de la mente humana a autolimitarse explica en parte el hecho de que la levadura haya permanecido oculta tanto tiempo, asegura. «Cuando se acostumbra a pensar que solo hay un hongo, no se ve otra cosa.»

Spribille, a su vez, reconoce que Goward ha ejercido una enorme influencia en su forma de razonar. Sus ensayos le han permitido pensar en los líquenes de un modo poco convencional y le han abierto los ojos para llegar a las deducciones sobre *Bryoria* junto con otros autores. Pero incluso así, confiesa: «Una de las mayores dificultades fue vencer mis reparos a la idea de que 150 años de bibliografía podrían haber pasado por alto la posibilidad teórica de que en la simbiosis liquénica pudiera participar más de un hongo».

Aunque no reniega en absoluto de su formación, Spribille sostiene que el énfasis académico en los conceptos establecidos resulta en sí mismo limitante. Al hallarse uno inmerso en esa cultura de mentes predispuestas se hace sumamente difícil pensar con creatividad, afirma.

Jonathan Foley, director ejecutivo de la Academia de Ciencias de California en San Francisco y con un prestigioso currículo académico, está bastante de acuerdo. (Foley es miembro del comité asesor de *Scientific American*.) Afirma que en lo que a ideas se refiere, la torre de marfil se ha transformado en una fortaleza. Los incentivos que ofrece la cultura académica para publicar en revistas reconocidas, conseguir financiación y obtener un puesto como titular no se avienen con la creatividad nata. Después del *Sputnik*, la ciencia se hiperprofesionalizó, explica Foley. La extrema especialización que exige el enfoque biotecnológico de la biología actual no deja tiempo al estudio

de la taxonomía o la epistemología. «Hoy hay graduados en biología de las mejores universidades de Estados Unidos que no saben cómo se llama nada de lo que crece en la naturaleza, que nunca han estudiado nada mayor que una célula», se asombra Foley. Ello significa que muchísimos biólogos no han salido del laboratorio y confían en la gente como Goward para hallar las especies que les gustaría estudiar o incluso como fuente de ideas para sus investigaciones.

A Spribille también le preocupa que sus estudiantes se queden anclados en el error, un estado mental que es incompatible con los descubrimientos innovadores. Señala a Goward como ejemplo de lo contrario. En el caso de *Bryoria*, intuyó la presencia de un tercer simbionte, aunque pensó erróneamente que se trataba de una bacteria. Pero estar en lo cierto no es el criterio que define una mente brillante, opina. Los intelectos privilegiados se caracterizan por una curiosidad y una visión crítica incansables, aptitudes que Spribille intenta fomentar en sus aulas. A sus alumnos les dice: «Poned todas vuestras ideas sobre la mesa; nadie va a burlarse aquí porque lancéis una que a lo mejor no aprovechemos». Él mismo sigue esa norma.

La unidad básica de la vida podría no ser el individuo, sino una red de individuos, ya sean los organismos que constituyen un liquen o los microbios que integran el microbioma humano

Algunos de los problemas más serios que la ciencia está intentando resolver en la actualidad, como el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad o la inseguridad alimentaria e hídrica, requieren una visión panorámica que integre múltiples perspectivas. Salir del laboratorio y retornar a la naturaleza para observar cómo funcionan los sistemas vivos es el primer paso. Un biólogo de la Universidad de Sur se planteó ese reto. David George Haskell pasó un año sentado en un metro cuadrado de un bosque virgen de Tennessee, simplemente observando, y escribió un libro que fue nominado al premio Pulitzer: *The forest unseen* [«El bosque desconocido»]. La experiencia fue una gran lección de humildad, relata. «Se adquiere plena conciencia de la propia ignorancia. He pasado décadas estudiando y enseñando biología, he publicado artículos científicos y demás, pero cuando me senté en el bosque, me di cuenta de que es muy poco lo que sé sobre él.» De esa humildad brotaron las semillas de la curiosidad y docenas de preguntas sobre las relaciones entre la flora y la fauna, su historia ecológica y cómo están vinculadas con el clima y la geología. Haskell trabaja ahora como asesor para el neoyorquino Instituto Open Space, donde ayuda a identificar los territorios con más probabilidades de resistir el cambio climático y que valdría la pena conservar.

Cuando el conocimiento se adquiere sobre todo a través de la bibliografía científica, nos distanciamos demasiado de los fenómenos reales que pretendemos descubrir, explica Haskell. Y aunque los instrumentos son importantes para ayudar a entender el mundo, nuestra mente se adueña de ideas prefijadas que se conectan directamente con nuestra conciencia. «Si regresamos a nuestros sentidos podemos aprender mucho sobre nuestro entorno.»

Goward ha convertido esa ética en su modo de vida. Su hogar, que ha bautizado como Edgewood Blue, situado en cuatro hectáreas colindantes con Wells Gray, dispone de agua corriente para la ducha y el fregadero, pero carece de inodoro. Una noche mientras me pongo el abrigo y los zapatos para salir fuera, el compañero de Goward, Curtis Björk, botánico, me invita a mirar al cielo y contemplar la Vía Láctea, que brilla en todo su esplendor en aquel cielo impoluto y oscuro. Al preguntarle por qué no tienen una letrina, Goward me responde que le gusta salir fuera cada día, incluso en pleno invierno. En esas salidas



ERICA GIES

LOS LÍQUENES pueblan todos los continentes y han sobrevivido un año y medio en el exterior de la Estación Espacial Internacional, totalmente expuestos a los rayos cósmicos.

ha contemplado la aurora boreal y los alces de paso. Cuando bromeo sobre la posibilidad de quedar empapado por la lluvia, sufrir el frío helador o ser acribillado por los mosquitos en verano, o incluso caer presa del puma que hace poco mató los cerdos de un vecino, Goward es tajante: «Así es la vida. No siempre es de color de rosa».

Para él, el auténtico peligro radica en nuestro distanciamiento de la naturaleza, cómodamente instalados en las ciudades, ignorantes de lo mucho que estamos degradando la naturaleza. Haskell asiente y subraya que ese alejamiento tiene implicaciones éticas. «Árboles, hongos, salamandras..., todos forman parte de nuestra gran familia, si hemos de creer a Darwin.» Según él, cuando no sabemos nada del mundo, tenemos una conciencia



ERICA GIES

EN SU CASA EN EL BOSQUE, Goward acoge un desfile continuo de biólogos, poetas y astrofísicos que elucubran sobre las formas de vida peculiares y los peligros que entraña el creciente distanciamiento entre el género humano y la naturaleza.

imperfecta de lo bien o lo mal que nuestra conducta repercute en el ambiente.

Pero para los científicos que no pueden dedicar un año, ni treinta, a la contemplación de la naturaleza, la colaboración o la amistad con las personas ajenas a los círculos académicos o de otras disciplinas puede dar pie a nuevos descubrimientos, como en el caso de Spribille.

La decoración de Edgewood está dominada por los libros, que sirven de hecho como papel pintado, alineados en estanterías caseras en la mayoría de las habitaciones. La cocina es el feudo de Björk, y cuando la cena está lista, ordena a Purple que haga entrar a los demás. El can come con nosotros en la mesa, haciendo gala de unos modales excelentes.

En la mesa también se sirven los debates más variopintos. «Intentamos hacer de este un lugar donde todo el mundo pueda expresar sus ideas», proclama Goward. Las virtudes y las flaquezas de la ciencia moderna son un tema frecuente, sin duda por la profunda querencia que se le tiene. La vida y las relaciones humanas también adquieren protagonismo, a veces con peculiares analogías a los líquenes. Aunque Goward se muestra seguro de sus ideas, a veces rayano en la arrogancia, está ansioso por sopesar nueva información. Sus argumentos están salpicados con referencias a los autores. Cuando menciono el libro de Haskell y un ensayo de Ursula K. Le Guin, me promete que los habrá leído para la próxima ocasión que charlemos.

Ante la reticencia que suelen mostrar los círculos científicos a la hora de publicar los trabajos de Goward, este divulga sus ideas de persona en persona. Él y Björk acogen un desfile incesante de biólogos, naturalistas en ciernes, poetas, geógrafos, ecólogos, astrofísicos y periodistas que permanecen en Edgewood un día, una semana, o incluso más, a cambio de trabajar un poco. Tanto Spribille como Crawford son invitados asiduos. «He paseado largamente por la naturaleza en su propiedad. Y hemos mantenido grandes conversaciones, de esas que estimulan el intelecto», afirma satisfecho Crawford.

A Goward le gustaría crear un lugar de reunión que posibilite una enseñanza más formal, que fomente el conocimiento básico de la biología en la próxima generación. Por eso ha ofrecido la mitad de su propiedad como centro de investigación a la Universidad Thompson Rivers, cerca de Kamloops, donde creció. También invita periódicamente a personas de diversas disciplinas a que acudan unos días para charlar.

En mi visita, Goward ahonda en una de sus líneas de estudio favoritas. ¿Qué son en realidad los líquenes: seres vivos, invernaderos de hongos, granjas de algas, ecosistemas, redes?

Lo que uno piense de ellos dependerá de la perspectiva de cada cual. Puesto que reciben el nombre científico de los hongos que lo componen, eso provoca el sesgo implícito de que la parte dominante es el hongo, una perspectiva limitada que Goward admite haber tenido en el pasado. Hoy ve los líquenes como una suerte de aporía. «El liquen por su naturaleza es como un portal, una entrada. Si se mira en un sentido, ve un ser vivo. Si mira en otro, ve un ecosistema», explica. Sus estudios sostienen que es preciso pensar en los líquenes no como sus componentes fúngicos y algales, ni siquiera como ecosistemas u organismos. Son todo ello a la vez: sistemas biológicos encapsulados en una membrana, líquenes como una entidad emergente. Al fin y al cabo, los que se enviaron al espacio sobrevivieron, a diferencia de las algas que los componen.

Considerar el liquen como un sistema concuerda con el gran cambio que ha experimentado la biología de ver la unidad fundamental de la vida como una comunidad o asociación, y no como un individuo. «Ya sea el microbioma del cuerpo humano o los árboles que interaccionan con los hongos subterráneos (micorrizas) o los líquenes, estamos comprobando que en el seno de los sistemas biológicos las relaciones en red son más fundamentales y más persistentes que los individuos», asegura Haskell.

En la opinión de Goward, los líquenes son los seres vivos que pueden contarnos más cosas sobre los vínculos y las conexiones. Como tales, aportan puntos de vista sobre la vida en su conjunto. «Los líquenes son mi ventana, pero es el acto de mirar el mundo lo que realmente despierta interés», explica. Los sistemas solo se mantienen cohesionados a la larga si las partes se consideran como integrantes del todo y si el todo protege las partes, como ocurre en el liquen. «Este es nuestro gran defecto. Como individuos, no nos preocupa el todo.»

PARA SABER MÁS

Cyanolichen distribution in young unmanaged forests: A dripzone effect? Trevor Goward y André Arsenault en *Bryologist*, vol. 103, n.º 1, págs. 28-37, primavera de 2000.

The forest unseen: A year's watch in nature. David George Haskell. Viking, 2012.

Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. Toby Spribille et al. en *Science*, vol. 353, págs. 488-492, 29 de julio de 2016.

Página web de Trevor Gowar donde se incluyen sus ensayos: **waysofenlichenment.net/ways/readings/index**

EN NUESTRO ARCHIVO

Las primeras formas de vida, a debate. Sarah Simpson en *IyC*, junio de 2003.

¿Qué es un organismo individual? Arantza Etxeberría en *IyC*, mayo de 2013.

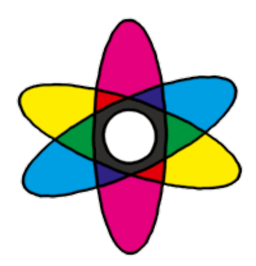
FÍSICA CUÁNTICA

El problema de la mecánica cuántica

El debate sobre su interpretación sigue ocupando a los físicos. ¿Es necesario modificar la teoría?

Steven Weinberg

Viñetas de Zach Weinersmith para Investigación y Ciencia



El desarrollo de la mecánica cuántica, en las primeras décadas del siglo xx, supuso una conmoción para muchos físicos. Hoy, a pesar de sus numerosos éxitos, continúa el debate sobre su significado y sobre su futuro.

La primera sorpresa llegó en forma de desafío para las nítidas categorías a las que se habían acostumbrado los físicos hacia el año 1900. Había partículas (átomos, electrones y núcleos) y campos (condiciones del espacio que impregnaban aquellas zonas en las que se ejercían fuerzas eléctricas, magnéticas o gravitatorias). Las ondas de luz se interpretaban con claridad como oscilaciones autosostenidas de campos eléctricos y magnéticos. Sin embargo, para entender ciertas propiedades de la luz emitida por los cuerpos calientes, Albert Einstein encontró en 1905 que las ondas de luz debían describirse como una corriente de partículas sin masa, más tarde llamadas fotones.

EN SÍNTESIS

La mecánica cuántica predice la probabilidad de encontrar un resultado u otro en un experimento. Sin embargo, la evolución de la función de onda queda gobernada por una ecuación determinista. ¿De dónde surgen entonces las probabilidades?

La postura instrumentalista, heredera de la interpretación de Copenhague, postula que la función de onda no es más que una mera herramienta para calcular probabilidades. Ello impide una formulación de las leyes físicas ajena al observador.

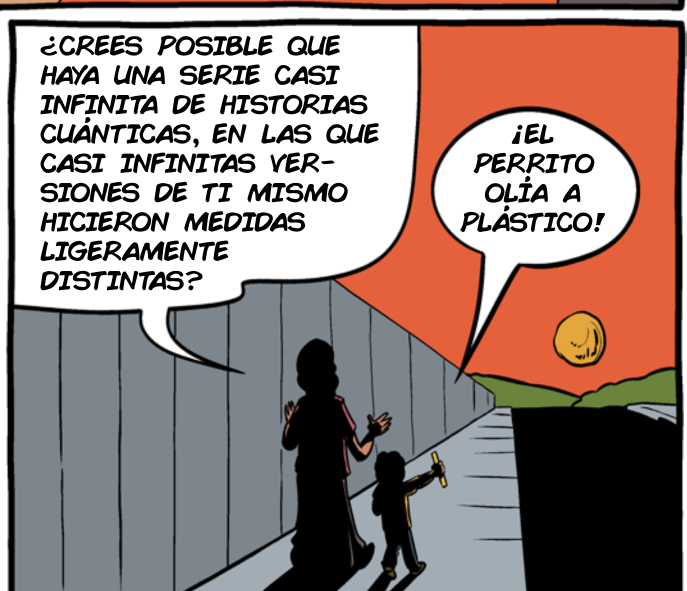
La postura realista interpreta la función de onda como una descripción fidedigna de la realidad. Sin embargo, eso parece implicar la existencia de muchos universos, así como la de algunos aspectos no locales de la realidad.

Tales problemas podrían estar indicando la necesidad de modificar las ecuaciones de la mecánica cuántica. Las leyes más generales para describir la evolución relativista de las probabilidades permiten, en principio, dichas modificaciones.


¡MAMÁ, HOY HEMOS APRENDIDO A MEDIR!


MUY BIEN. ¿Y HABÉIS MEDIDO ALGO QUE YA ERA "REAL"? ¿O FUE EL ACTO DE MEDIR LO QUE HIZO QUE LA CANTIDAD MEDIDA COBRASE EXISTENCIA?
¡HEMOS MEDIDO UN PERRITO DE JUGUETE!


¿CREES QUE TU INTELIGENCIA CONSCIENTE TUVO ALGO QUE VER CON TU CAPACIDAD PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DEL PERRITO?
¡EL PERRITO ERA UN PERRITO AZUL!


¿CREES POSIBLE QUE HAYA UNA SERIE CASI INFINITA DE HISTORIAS CUÁNTICAS, EN LAS QUE CASI INFINITAS VER-SIONES DE TI MISMO HICIERON MEDIDAS LIGERAMENTE DISTINTAS?
¡EL PERRITO OLÍA A PLÁSTICO!




A VER, ¿HABÉIS APRENDIDO ALGO SOBRE QUÉ SIGNIFICA MEDIR?


MAMÁ, NI SIQUIERA USAMOS EL SISTEMA MÉTRICO.
PUEDE QUE TENGA QUE AJUSTAR MIS EXPECTATIVAS...

En los años veinte, según las teorías desarrolladas por Louis de Broglie y Erwin Schrödinger, parecía que los electrones, a los que siempre se había considerado partículas, se comportaban en ocasiones como ondas. Para poder explicar las energías de los estados estables de los átomos, los físicos tuvieron que abandonar la idea de que los electrones actuaban como pequeños planetas newtonianos en órbita alrededor del núcleo. Un electrón en un átomo quedaba mucho mejor descrito en términos de ondas, las cuales se acomodaban en torno al núcleo de modo análogo a como las ondas sonoras se adecúan a la longitud del tubo de un órgano (un fenómeno que solo permite que aparezcan ciertas notas o, en el caso del átomo, limita las energías posibles de los estados). Las distintas categorías del mundo habían quedado mezcladas de manera irremediable.

Peor aún: las ondas de los electrones no eran ondas de materia electrónica, al modo en que las olas del océano son ondas de agua. Antes bien, como advirtiera Max Born, la onda del electrón es una onda de probabilidad. Cuando un electrón choca contra un átomo, resulta imposible predecir en qué dirección rebotará. Tras el encuentro, la onda correspondiente se dispersa en todas direcciones, al igual que ocurre con una ola en un arrecife. Pero, como comprendió Born, eso no quiere decir que el electrón en sí se esparza. Tomará una dirección bien definida, pero no una que podamos predecir. Resulta más probable que rebote en una dirección en la que la onda es más intensa, pero cualquier dirección es posible.

La probabilidad no era algo ajeno a los físicos de los años veinte. No obstante, se pensaba que esta simplemente reflejaba un conocimiento incompleto del sistema bajo estudio, no un indeterminismo intrínseco a las leyes de la física. Las teorías de Newton sobre el movimiento y la gravitación habían establecido el estándar de las leyes deterministas: si conocemos razonablemente bien la posición y la velocidad de cada uno de los cuerpos del sistema solar en un momento dado, las leyes de Newton nos permitirán determinar con buena precisión dónde se encontrarán todos ellos mucho tiempo después. En la física newtoniana, la probabilidad solo aparece cuando nuestro conocimiento es imperfecto; como, por ejemplo, cuando ignoramos los detalles del lanzamiento de un dado. Sin embargo, en la nueva mecánica cuántica, el determinismo parecía haber desaparecido de las leyes mismas de la física.

Todo esto resultaba muy extraño. En una carta escrita a Born en 1926, Einstein escribía:

> *La mecánica cuántica es muy impactante. Sin embargo, una voz interna me dice que no es aún lo definitivo. La teoría da cuenta de mucho, pero no hace nada por acercarnos a los secretos del Viejo. En todo caso, yo estoy convencido de que Él no juega a los dados.*

Años después, en una de sus conferencias Messenger impartidas en Cornell en 1964, Richard Feynman se lamentaba: «Creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica». La ruptura de la mecánica cuántica con el pasado fue tan profunda que todas las teorías físicas previas acabaron denominándose «clásicas».

No obstante, la extrañeza que despertaba la mecánica cuántica carecía de importancia para la mayoría de las aplicaciones. Los físicos aprendieron a usarla para efectuar cálculos cada vez más precisos sobre los niveles de energía de los átomos y sobre la probabilidad de que las partículas saliesen despedidas en una dirección u otra en una colisión. En su libro *Un universo de la nada* (Pasado & Presente, 2013), el físico de la Universidad de Arizona Lawrence Krauss ha definido el cálculo de cierto efecto en el espectro del átomo de hidrógeno como «la mejor y más precisa predicción de toda la ciencia». Más allá de la física atómica, algunas aplicaciones tempranas de la mecánica cuántica enumeradas por el físico Gino Segrè, de la Universidad de Pensilvania, incluyen los enlaces moleculares, las desintegraciones radiactivas, la conductividad eléctrica, el magnetismo y la radiación electromagnética. Otros usos posteriores abarcan las teorías de la semiconductividad y la superconductividad, las enanas blancas y las estrellas de neutrones, las fuerzas nucleares y las partículas elementales. Incluso las especulaciones modernas más aventuradas, como la teoría de cuerdas, se basan en los principios de la mecánica cuántica.

Muchos físicos llegaron a pensar que las reacciones de Einstein, Feynman y otros ante la extrañeza de la mecánica cuántica habían sido exageradas. Esa era también mi opinión. A fin de cuentas, incluso las teorías de Newton fueron difíciles de aceptar para sus coetáneos. Newton había postulado lo que sus críticos veían como una fuerza oculta, la gravedad, la cual no parecía relacionada con nada tangible capaz de tirar y empujar, y que no podía explicarse sobre la base de la filosofía o la matemática pura. Además, sus teorías renunciaban a una de las metas principales de Ptolomeo y Kepler, como era calcular, a partir de primeros principios, las órbitas planetarias. Con todo, la oposición a las ideas newtonianas acabaría esfumándose. Newton y sus seguidores lograron dar cuenta no solo del movimiento de los planetas y las manzanas que caen, sino también del de los cometas y las lunas, de la forma de la Tierra y de los cambios de dirección de su eje de rotación. Hacia finales del siglo XVIII, todos esos éxitos habían otorgado a las teorías de Newton sobre el movimiento y la gravitación el estatus de correctas o, al menos, el de una aproximación extraor-

Steven Weinberg es físico teórico en la Universidad de Texas en Austin. Ha destacado por sus contribuciones a la teoría cuántica de campos y por sus aportaciones al modelo estándar de la física de partículas. En 1979 recibió el premio Nobel de física por su formulación de la teoría electrodébil.



SERIE

LA INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

PARTE 1

La charla. Por Scott Aaronson y Zach Weinersmith (Julio de 2017)

Mecánica cuántica: interpretación y divulgación. Por Adán Sus (Julio de 2017)

PARTE 2

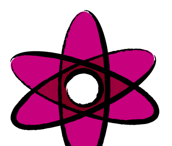
El problema de la mecánica cuántica. Por Steven Weinberg (págs. 66-72)

PARTE 3

El puzle de la teoría cuántica. Por Adán Cabello (Septiembre de 2017)

dinariamente precisa. Sin duda, es un error exigir de manera demasiado estricta que las nuevas teorías físicas se ajusten a nuestros prejuicios filosóficos.

En mecánica cuántica, el estado de un sistema en un instante dado no queda descrito por la lista de posiciones y velocidades de cada una de las partículas y por los valores y las tasas de cambio de los distintos campos, como ocurre en física clásica. En su lugar, viene dado por una función de onda: en esencia, una lista de números, uno por cada posible configuración del sistema (tales números son complejos; es decir, de la forma $a + bi$, donde a y b denotan números reales e i corresponde a la raíz cuadrada de –1). Si se trata de una sola partícula, tendremos un número asociado a cada una de las posiciones que esta pueda ocupar en el espacio. Esto se asemeja a la descripción de una onda sonora en física clásica; sin embargo, en el caso del sonido, el número asociado a cada posición del espacio nos indica la presión del aire en dicho punto. En mecánica cuántica, el número que la función de onda asigna a una posición dada refleja la probabilidad de encontrar la partícula allí. ¿Qué hay de terrible en ello? Sin duda, Einstein y Schrödinger cometieron un profundo error al resistirse a *usar* la mecánica cuántica, aislándose a sí mismos en la etapa final de sus vidas de los emocionantes progresos logrados por sus colegas.



NO OBSTANTE, HOY NO ESTOY TAN SEGURO COMO LO ESTUVE UNA VEZ ACERCA DEL FUTURO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA. Es una mala señal que aquellos físicos que en la actualidad más cómodos se sienten con ella no consigan ponerse de acuerdo sobre su significado. La controversia aparece, principalmente, al considerar la naturaleza de la medición en mecánica cuántica. La idea puede ilustrarse mediante un ejemplo sencillo: la medida del espín de un electrón (el espín de una partícula a lo largo de una dirección dada refleja cuánto rota la materia en torno al eje correspondiente a dicha dirección).

Todas las teorías indican, y los experimentos confirman, que cuando medimos la magnitud del espín de un electrón en una dirección determinada solo hay dos resultados posibles. Uno de ellos es un número positivo, igual a una constante universal de la naturaleza (h, la constante originalmente introducida por Max Planck en su teoría de la radiación térmica de 1900, dividida por 4π). El otro resultado es el opuesto, el negativo del anterior. Los valores positivos o negativos del espín corresponden a un electrón que gira en sentido horario o antihorario con respecto al eje considerado.

Sin embargo, es solo cuando llevamos a cabo la medición cuando estas dos opciones aparecen como las únicas posibles. Un espín que no ha sido medido es como un acorde musical formado por la superposición de dos notas, la correspondiente al espín positivo y al negativo, cada una con su propia amplitud. Y al igual que un acorde produce un sonido distinto del que generan sus notas constitutivas por separado, el estado de espín de un electrón que aún no ha sido medido difiere cualitativamente de cada uno de los dos estados de espín bien definido. En esta analogía musical, es como si el acto de medir transfiriese toda la intensidad del acorde a una sola de las notas, la cual escuchamos entonces por sí sola.

Pongamos lo explicado hasta ahora en términos de la función de onda. Si dejamos de lado todos los aspectos de un electrón salvo su espín, no queda mucho de ondulatorio en su función de onda: esta constará de dos números, uno por cada signo del espín en la dirección escogida, análogos a las amplitudes de cada una de las notas del acorde. (Por simple que pueda parecer, semejante función de onda incorpora mucha más información que la mera elección entre el valor positivo y el negativo. Es justamente esa información extra lo que hace que las computadoras cuánticas, las cuales almacenan los datos en funciones de onda de esta clase, sean mucho más potentes que las ordinarias.) La función de onda de un electrón cuyo espín aún no hemos medido tiene, de manera general, amplitudes no nulas para cada uno de los dos estados de espín bien definido.

Hay una regla en mecánica cuántica, conocida como regla de Born, la cual nos indica cómo usar la función de onda para calcular la probabilidad de obtener los distintos resultados posibles en un experimento. Por ejemplo, dicha regla establece que, al medir el espín en una dirección determinada, la probabilidad de obtener el valor positivo o el negativo resultará proporcional al cuadrado del número que la función de onda asocia a cada uno de esos dos estados de espín (en rigor, se trata del cuadrado del módulo del número complejo correspondiente).

La introducción de la probabilidad en los principios de la física perturbó a muchos en el pasado. Pero el problema de la mecánica cuántica no es que implique probabilidades. Podemos vivir con eso. El problema radica en que, en mecánica cuántica, la manera en que evoluciona la función de onda a lo largo del tiempo queda gobernada por una ecuación, la ecuación de Schrödinger, *la cual no implica probabilidades*. Es tan determinista como lo eran las ecuaciones de Newton para el movimiento y la gravitación. En otras palabras: dada la función de onda en un instante determinado, la ecuación de Schrödinger predice con exactitud cuál será la función de onda en cualquier momento futuro. Ni siquiera existe la posibilidad del caos, la sensibilidad extrema a las condiciones iniciales que sí permite la mecánica newtoniana. De manera que, si consideramos que todo el

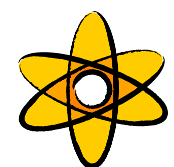


proceso de medición se rige por las ecuaciones de la mecánica cuántica, y resulta que dichas ecuaciones son perfectamente deterministas, *¿cómo aparecen las probabilidades en mecánica cuántica?*

Una respuesta común es que, al efectuar una medida, el espín (o cualquier otra cantidad que estemos midiendo) queda sometido a una interacción con un entorno macroscópico que lo zarandea de manera impredecible. Dicho entorno podría ser la lluvia de fotones del haz de luz que usamos para observar el sistema, tan impredecible en la práctica como una cascada de gotas de lluvia. Eso desbarataría la superposición de estados y conduciría a un resultado imposible de vaticinar (este proceso recibe el nombre de «decoherencia»). Sería como si, de alguna manera, un fondo ruidoso hiciese audible una sola de las notas que componen un acorde. Sin embargo, esta respuesta evade la pregunta. Si la ecuación de Schrödinger, que es determinista, no solo gobierna la evolución del espín, sino también la del aparato de medida e incluso la del físico que realiza el experimento, entonces los resultados no deberían ser en principio impredecibles. De modo que, una vez más, nos enfrentamos al problema sobre el origen de las probabilidades en mecánica cuántica.

En los años veinte del siglo pasado, Niels Bohr ofreció una respuesta a esta pregunta de la mano de lo que más tarde daría en llamarse interpretación de Copenhague. Según Bohr, al efectuar una medición, el estado de un sistema «colapsa» a un resultado u otro de una manera que, en sí misma, no se puede describir con la mecánica cuántica y que resulta verdaderamente impredecible. Esta respuesta es hoy ampliamente considerada como inaceptable. No parece haber ningún modo de situar la frontera entre los regímenes en los que, según Bohr, la mecánica cuántica puede aplicarse o no. Se da la circunstancia de que yo fui estudiante de posgrado en el instituto de Bohr, en Copenhague. Pero en aquella época él era un gigante y yo era muy joven, y nunca tuve la oportunidad de preguntarle sobre estos asuntos.

En la actualidad existen dos posturas predominantes sobre la mecánica cuántica: la realista y la instrumentalista, las cuales ven de modo muy diferente el origen de la probabilidad en el proceso de medida. Por las razones que explicaré a continuación, ninguna de ellas me resulta verdaderamente satisfactoria.



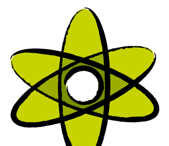
LA POSTURA INSTRUMENTALISTA es descendiente de la interpretación de Copenhague. Sin embargo, en lugar de postular una frontera a partir de la cual la realidad ya no queda descrita por la mecánica cuántica, rechaza que la mecánica cuántica en su totalidad constituya una descripción de la realidad. Sigue habiendo una función de onda, pero esta ya no es real, como una partícula o un campo, sino un mero instrumento para calcular las probabilidades de los distintos resultados que podemos obtener cuando efectuamos una medida.

En mi opinión, el problema de este enfoque no es solo que renuncie a una meta fundamental de la ciencia: describir qué ocurre realmente «ahí fuera». Se trata de una capitulación particularmente desafortunada. Según la postura instrumentalista, tendríamos que aceptar, como leyes fundamentales de la naturaleza, las reglas (como la regla de Born) sobre cómo usar la función de onda para calcular las probabilidades de los resultados cuando los humanos llevamos a cabo una medición. Como consecuencia, el ser humano entra en las leyes de la naturaleza a su nivel más fundamental. Según Eugene Wigner, uno de los pioneros de la teoría cuántica, «no es posible formular las leyes fundamentales de la mecánica cuántica de un modo completamente coherente sin hacer referencia a la consciencia».

Así pues, la postura instrumentalista da la espalda a la idea, posible desde Darwin, de un mundo gobernado por leyes impersonales, las cuales controlan el comportamiento humano junto con todo lo demás. No es que nos opongamos a pensar en el papel del ser humano. Nos gustaría entender la relación entre los

humanos y la naturaleza. Pero, en lugar de limitarnos a asumir el carácter de dicha relación incorporándola en lo que creemos que son las leyes fundamentales, preferiríamos deducirla a partir de leyes que no hagan referencia explícita a los humanos. Puede que tarde o temprano tengamos que renunciar a este objetivo, pero no creo que ese momento haya llegado aún.

Algunos de los físicos que adoptan la postura instrumentalista defienden que las probabilidades que se extraen de la función de onda son en realidad probabilidades objetivas, independientes de si hay o no humanos efectuando una medida. En mi opinión, este argumento es insostenible. En mecánica cuántica, las probabilidades no existen hasta que alguien elige qué va a medir, como el espín a lo largo de una dirección u otra. A diferencia de lo que ocurre en física clásica, aquí es necesario hacer una elección, ya que la mecánica cuántica nos impide medir todo al mismo tiempo. Como advirtió Werner Heisenberg, una partícula no puede tener simultáneamente una posición y una velocidad definidas: medir una nos impide medir la otra. De igual modo, si conocemos la función de onda que describe el espín de un electrón, podremos calcular la probabilidad de que el espín adopte un valor positivo en la dirección norte si eso es lo que decidimos medir, o un valor positivo en la dirección este si eso es lo que deseamos medir. Sin embargo, no podemos preguntar acerca de la probabilidad de que el espín sea positivo en ambas direcciones, ya que no existe ningún estado en el que el espín de un electrón adopte un valor definido en dos direcciones distintas.



TALES PROBLEMAS PUEDEN SORTEARSE PARCIALMENTE EN LA POSTURA REALISTA —en cuanto opuesta a la instrumentalista— acerca de la mecánica cuántica. En ella, la función de onda y su evolución determinista son consideradas como una descripción genuina de la realidad. No obstante, esto nos aboca a otros problemas.

La postura realista encierra una implicación muy extraña, la cual fue señalada por primera vez por Hugh Everett en su tesis doctoral, leída en 1957 en la Universidad de Princeton. Cuando un físico mide el espín de un electrón en una dirección dada, digamos en la dirección norte, la función de onda asociada al electrón, al aparato de medida y al físico mismo evoluciona de manera determinista, como dicta la ecuación de Schrödinger. Sin embargo, como consecuencia de su interacción durante el proceso de medida, dicha función de onda se convierte en una superposición de dos componentes: una en la que el espín es positivo y en la que todo aquel que mire pensará que es positivo; y otra en la que el espín es negativo y en la que todo el mundo cree que es negativo. Dado que en cada componente todos creen que el espín posee un signo bien definido, dicha superposición resulta indetectable. De hecho, la historia del mundo se ha dividido en dos ramas, cada una desconectada de la otra.

Aunque todo esto ya resulta bastante extraño, esa división de la historia no se limitaría a las situaciones en las que alguien mide un espín. Según la imagen realista, el mundo se está bifurcando de manera constante: lo hace cada vez que un cuerpo macroscópico queda vinculado a una alternativa entre estados cuánticos. Esta inconcebible variedad de historias coexistentes ha alimentado numerosas historias de ciencia ficción y ofrece una justificación para la idea del multiverso, en el que la historia cósmica en la que nos encontramos ha de cumplir con el requisito de presentar condiciones lo suficientemente benignas como para permitir la existencia de seres vivos conscientes [*véase* «El multiverso cuántico», por Yasunori Nomura, *en este mismo número*]. Pero la panorámica de todas estas historias paralelas resulta profundamente inquietante y, al igual que otros físicos, yo también preferiría una sola historia.

La postura instrumentalista da la espalda a la idea, posible desde Darwin, de un mundo gobernado por leyes impersonales que controlan el comportamiento humano junto con todo lo demás

En todo caso, y más allá de nuestras provincianas preferencias particulares, hay otro aspecto poco satisfactorio del enfoque realista. Según este, la función de onda del multiverso evoluciona de manera determinista. Podemos seguir pensando en las probabilidades como en el porcentaje de las ocasiones que aparece cada resultado cuando en cualquiera de esas historias repetimos muchas veces un experimento. Sin embargo, las reglas que gobiernan qué probabilidades observamos tendrían que poder obtenerse a partir de la evolución determinista del multiverso como un todo. En caso contrario, para predecir esas probabilidades tendremos que hacer suposiciones adicionales sobre qué ocurre cuando los humanos efectuamos medidas, lo que nos trae de nuevo a los problemas de la postura instrumentalista. Ha habido varios intentos por incorporar en el enfoque realista varias reglas que, como la regla de Born, sabemos que dan buenos resultados experimentales. Pero, en mi opinión, no han tenido éxito.

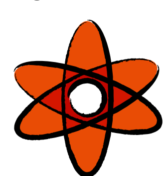
El enfoque realista ya se había topado con otro problema mucho antes de que Everett postulara sus múltiples historias. Dicha dificultad quedó plasmada en un artículo escrito en 1935 por Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, y guarda relación con el fenómeno conocido como entrelazamiento cuántico.

Tendemos a pensar que la realidad admite una descripción local. Yo puedo hablar de lo que ocurre en mi laboratorio y usted puede describir lo que sucede en el suyo, pero no tenemos la necesidad de hablar simultáneamente de lo que pasa en ambos. En mecánica cuántica, sin embargo, es posible que un sistema físico se encuentre en un estado entrelazado, en el que las correlaciones entre sus partes constituyentes persisten aunque estas se hallen arbitrariamente lejos una de otra, como si fuesen los extremos de una vara rígida y de gran longitud.

Consideremos el estado de un par de electrones cuyo espín total en cualquier dirección es cero. En un estado así, la función de onda (cuando dejamos de lado todo menos el espín) viene dada por una suma de dos términos: en uno de ellos el electrón A tiene espín positivo en, por ejemplo, la dirección norte, mientras que el electrón B tiene espín negativo en esa misma dirección; en el otro término, los signos positivo y negativo estarán intercambiados. Decimos entonces que los espines están entrelazados. Si no intervenimos, ese estado entrelazado

persistirá por más que los electrones se separen una distancia arbitrariamente grande. Con independencia de cuán lejos se hallen, en semejante situación solo tiene sentido hablar de la función de onda de los dos electrones, no de la de cada uno de ellos por separado. El entrelazamiento contribuyó al recelo de Einstein hacia la mecánica cuántica mucho más que la aparición de probabilidades.

Por extraño que nos resulte, el entrelazamiento cuántico puede observarse en los experimentos. Pero ¿cómo es posible que algo tan no local represente la realidad?



¿QUÉ CABE HACER CON TODOS ESTAS LIMITACIONES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA? Una respuesta razonable es la ya legendaria recomendación que suele darse a los estudiantes inquisitivos: «cállate y calcula». No existen dudas acerca de cómo utilizar la mecánica cuántica, sino solo sobre cómo describir lo que significa, así que tal vez el problema no sea más que uno de falta de palabras adecuadas.

Por otro lado, puede que las dificultades para entender el proceso de medición en su formulación actual nos estén alertando de que la teoría necesita modificaciones. La mecánica cuántica funciona tan bien cuando la aplicamos a los átomos que cualquier teoría que pudiera sustituirla tendría que ser casi indistinguible de ella al aplicarla a objetos tan diminutos. Sin embargo, quizá pueda diseñarse una nueva teoría en la que las superposiciones de los estados asociados a objetos de gran tamaño, como los físicos y sus aparatos de medida, experimenten un colapso rápido y espontáneo incluso estando aislados, y en la que las probabilidades evolucionen hasta alcanzar los resultados que dicta la mecánica cuántica. Las múltiples historias de Everett convergerían de manera natural en una sola. El objetivo de concebir una nueva teoría es lograr que todo esto ocurra sin necesidad de otorgar a la medida ningún papel especial en las leyes de la física, sino como parte de lo que, en la teoría poscuántica, sería un proceso físico ordinario.

Una de las dificultades a la que nos enfrentamos es que carecemos de pistas experimentales: hasta la fecha, todos los datos concuerdan con las predicciones de la mecánica cuántica. Sin embargo, existen algunos principios generales que, de modo sorprendente, acotan sobremanera las formas que podría adoptar esa nueva teoría.

En primer lugar, las cantidades que representen probabilidades tendrán que venir dadas por números positivos, los cuales habrán de sumar siempre 100 por cien. Otro requisito, también satisfecho en mecánica cuántica, es que, en un estado entrelazado, la evolución de las probabilidades durante la medida no puede permitir el envío instantáneo de información. Eso violaría la teoría de la relatividad, la cual prohíbe la existencia de señales que viajen más rápido que la luz.

Al combinar estas dos condiciones, puede verse que la ley más general para la evolución de las probabilidades ha de estar regida por una ecuación de un tipo conocido como «ecuaciones de Lindblad». Esta familia incluye la ecuación de Schrödinger como un caso particular, pero en general comprende toda una variedad de cantidades nuevas, las cuales representan desviaciones con respecto a la mecánica cuántica. Por supuesto, se trata de cantidades cuyos detalles desconocemos. A pesar de haber pasado prácticamente inadvertida fuera de la comunidad teórica, hay una serie de artículos interesantes, los cuales se remontan a un influyente trabajo publicado en 1986 por Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, de la Universidad de Trieste, que han usado las ecuaciones de Lindblad para generalizar la mecánica cuántica de varias maneras.

Por mi parte, hace poco he estado estudiando la posibilidad de buscar experimentalmente desviaciones de la mecánica cuántica con relojes atómicos. La base de estos dispositivos es un instrumento inventado por el ya fallecido Norman Ramsey, de Harvard, el cual sirve para ajustar la frecuencia de una radiación de microondas o visible y acompasarla con la frecuencia de oscilación de la función de onda de un átomo que se halla en una superposición de dos estados de diferente energía. Esta última viene dada por la diferencia de energía de los dos estados atómicos dividida por la constante de Planck. Tiene el mismo valor independientemente de las condiciones externas, por lo que sirve como referencia fija para la frecuencia, del mismo modo en que el cilindro de paladio e iridio custodiado en Sèvres sirve como referencia para la unidad de masa.

Ajustar la frecuencia de una onda electromagnética para que iguale dicha frecuencia atómica viene a ser como ajustar un metrónomo para acompasarlo con otro. Si los ponemos en marcha al mismo tiempo y siguen sincronizados después de, digamos, mil pulsaciones, sabremos que las frecuencias de uno y otro coinciden en, al menos, una parte por cada mil. La mecánica cuántica predice que, en algunos relojes atómicos, ese ajuste debería alcanzar una precisión de una parte en 100.000 billones ($1/10^{17}$), un nivel que de hecho se alcanza en el laboratorio. Sin embargo, si las correcciones a la mecánica cuántica representadas por los nuevos términos de la ecuación de Lindblad fueran de una parte en 100.000 billones, entonces dicha precisión se habría perdido. Por tanto, sabemos que los nuevos términos han de implicar una corrección aún menor.

¿Cuán relevante es esta cota? Por desgracia, las ideas para modificar la mecánica cuántica no solo son especulativas, sino también vagas, por lo que ignoramos qué magnitud deberían alcanzar tales correcciones. En lo que atañe no solo a este asunto, sino de manera más general al futuro de la mecánica cuántica, solo puedo repetir las palabras de Viola en *Noche de Reyes*: «Oh, tiempo, tú debes desenmarañar esto, no yo». IyC

Artículo publicado originalmente en The New York Review of Books *con el título «The trouble with quantum mechanics».*

PARA SABER MÁS

Lectures in quantum mechanics. Steven Weinberg. Cambridge University Press, segunda edición, 2015.
Lindblad decoherence in atomic clocks. Steven Weinberg in *Physical Review A*, vol. 94, art. 042117, octubre de 2016.
El gran cuadro: Los orígenes de la vida, su sentido y el universo entero. Sean Carroll. Pasado & Presente, 2017.
La publicación original de este artículo provocó una gran cantidad de comentarios. Una selección de ellos y la réplica del autor pueden encontrarse en **www.nybooks.com/articles/2017/04/06/steven-weinberg-puzzle-quantum-mechanics**. Incluye cartas de David Mermin, Jeremy Bernstein, Michael Nauenberg, Jean Bricmont, Sheldon Goldstein y Tim Maudlin.

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría cuántica y realidad. Bernard D'Espagnat en *IyC*, enero de 1980.
Los muchos mundos de Hugh Everett. Peter Byrne en *IyC*, febrero de 2008.
Más allá del horizonte cuántico. David Deutsch y Artur Ekert en *IyC*, noviembre de 2012.
Efectos cuánticos macroscópicos. Markus Aspelmeyer y Markus Arndt en *IyC*, marzo de 2013.
Bayesianismo cuántico. Hans Christian von Baeyer en *IyC*, agosto de 2013.
Teorías supracuánticas. Miguel Navascués en *IyC*, septiembre de 2016.

PALEONTOLOGÍA

EL color genuino DE LOS DINOSAURIOS





PSITTACOSAURUS es uno de los dinosaurios cuyo color ha sido posible deducir gracias a los pigmentos fosilizados.

Considerada en el pasado como imposible, la preservación de los pigmentos fósiles abre la puerta a la recreación de fauna extinta con una fidelidad nunca vista. Un logro que también permitiría conocer con detalle sus hábitos

Jakob Vinther

Jakob Vinther aspiraba a ser botánico hasta que a los once años halló sus primeros fósiles en un campamento estival en su Dinamarca natal. Hoy es profesor titular de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ciencias de la Tierra en la Universidad de Bristol. Su investigación gira en torno a los pigmentos y otras moléculas conservadas en fósiles.



En octubre de 2006 me hallaba en penumbras en un laboratorio de la Universidad de Yale mirando a través del microscopio electrónico la tinta fosilizada de un pariente de los calamares de 200 millones de años de antigüedad. En la imagen aparecía un mar de esferas translúcidas, cada una de apenas una quinta parte de micra. Para el ojo neófito significarían muy poco, pero yo las contemplaba fascinado. Estos vestigios eran muy similares a los gránulos de melanina, el pigmento que colorea la tinta de los calamares y los pulpos.

Quizá tal similitud no debería haberme sorprendido, pues dos años antes ya se había anunciado el primer descubrimiento de gránulos de tinta fósiles. Pero contemplarlos con mis propios ojos era toda una revelación. Gracias al examen de especímenes de cefalópodos procedentes de diversos yacimientos y épocas, me di cuenta de que su tinta era siempre la misma, perfectamente conservada a lo largo de cientos de millones de años.

El soberbio estado de conservación de la tinta me llevó a preguntarme si la melanina se habría conservado también en fósiles de otros grupos zoológicos. Es el mismo pigmento que colorea el cabello, la piel, las plumas y los ojos a los que confiere tonos rojos, pardos, grises o negros o hace desprender brillos metálicos. Si halláramos melanina en otros fósiles, tal vez sería posible reconstruir su coloración en vida, incluso la de los dinosaurios. Durante décadas, los paleontólogos han supuesto que los pigmentos casi nunca sobreviven al proceso de fosilización. Los raros ejemplos de fósiles que conservan el color proceden de animales invertebrados, pero no es nada corriente en los vertebrados. Así, los expertos solían especular con el color de los animales prehistóricos tomando como modelo las especies actuales. Esto explica que las reconstrucciones cromáticas de los dinosaurios sean tan variopintas: unas adoptan los monótonos colores terrosos propios de la mayoría de los anfibios y reptiles actuales, mientras que otras lucen toda la paleta del arcoíris emulando a las aves (los únicos dinosaurios supervivientes).

Pero los descubrimientos acaecidos en los últimos once años ponen en entredicho algunas de esas suposiciones. El análisis al que nuestro equipo ha sometido decenas de fósiles revela numerosos ejemplos de estructuras microscópicas que pudieron contener melanina. El estudio de su forma y disposición ha permitido deducir los colores y la librea de algunos dinosaurios y otros animales prehistóricos. A su vez, esa información sobre su apariencia física nos ha permitido formarnos una imagen más intrigante sobre su comportamiento y su hábitat.

Para comprobar mi hipótesis de que la melanina perdura en otros fósiles y que permite deducir los verdaderos colores de los animales extintos, me propuse encontrar y analizar fósiles con manchas oscuras que indicaran la preservación de restos orgánicos en aquellas partes del cuerpo que suelen albergar melanina: la superficie exterior del cuerpo y los ojos. Necesitaba examinar las áreas oscuras con el microscopio electrónico y, por tanto, en ocasiones debía extraer una muestra pequeña. Pero los fósiles bien conservados no abundan, y los museos los guardan con gran celo. Por suerte, en Dinamarca, mi país natal, existe un yacimiento en las formaciones *Fur* y *Ølst* que contiene magníficos fósiles de aves con restos del plumaje. Tras convencer al conservador de fósiles vertebrados del Museo Geológico de Copenhague, pude sacar muestras de un bloque de piedra caliza del tamaño de una máquina de escribir que mostraba pequeñas manchas donde antaño estuvieron los ojos y un halo oscuro con la impresión de plumas. Corté una pieza del tamaño de una rebanada de pan que pude introducir en el microscopio electrónico del museo.

Tenía muchas pistas de lo que debía buscar. Antes de sacar aquella muestra del ave fósil había leído una pila de artículos para saber cuál era la apariencia de la melanina en las plumas actuales. Este pigmento se sintetiza en los melanocitos, células especializadas provistas de melanosomas, orgánulos donde se acumula y permanece confinado. De entre 0,5 y 2 micras de longitud, los melanosomas adoptan dos morfologías: una alargada o bacilar, como una salchicha, en cuyo seno se produce la eumelanina, un tipo que absorbe todas las longitudes de onda de la luz y, por tanto, es el responsable de las tonalidades oscuras de la tinta del calamar y el plumaje del cuervo; y otra redondeada, como una albóndiga, donde se sintetiza la feomelanina,

PÁGINAS ANTERIORES: GREG RUTH

EN SÍNTESIS

Hasta hace poco se consideraba que cualquier aproximación a los colores de los dinosaurios y de otros animales extintos era mera conjetura.

Pero los recientes descubrimientos de pigmentos fósiles en una gran variedad de especies han dado un vuelco a esa idea.

El análisis de los pigmentos permite deducir los colores reales de la fauna prehistórica. Además, la librea puede revelar otros aspectos desconocidos sobre su forma de vida.

que confiere tonos rojizos o amarillentos. La ausencia de pigmento da como resultado un plumaje blanco. Otras coloraciones como el gris o el pardo surgen de la mezcla de ambas variedades y de la ausencia de pigmento.

También consulté a uno de los mayores expertos en coloración aviar: Richard Prum, de la Universidad Yale. Gracias a la tinta de los fósiles sabía que la eumelanina podía conservarse y pensé que era mejor iniciar la búsqueda por las plumas. Conversando con él y su a la sazón estudiante de doctorado Vinod Saranathan, supe que los melanosomas alargados se reparten de forma distintiva a lo largo de las barbas y barbillas que conforman el estandarte de la pluma. Los melanosomas acaban allí durante el desarrollo, cuando los melanocitos los transfieren a las células especializadas que dan forma a las plumas y el pelo: los queratinocitos.

Como supuse, cuando enfoqué el instrumento a alta potencia sobre las plumas fósiles me encontré con millones de varitas bacilares. Por desgracia, el metropolitano de la capital danesa circula a menos de 50 metros del sótano del museo donde se encuentra el microscopio y las vibraciones causadas por el incesante paso de los convoyes me impidieron captar imágenes nítidas. Aún así, eran lo bastante buenas como para ver los corpúsculos alargados. Sin tardanza las envié por correo electrónico a mi director de tesis doctoral en la Universidad Yale, Derek Briggs, pionero en el estudio de fósiles primorosamente conservados. Me respondió con menos entusiasmo del que esperaba, aclarándome que las estructuras en cuestión eran las mismas que décadas atrás otros colegas y él mismo habían descubierto en muestras fosilizadas de plumas y de pelo de mamífero, que habían sido identificadas como bacterias.

Pese a ello, seguí pensando que eran melanosomas y le expuse mis razones. No solo su forma y tamaño parecían concordar, sino que su distribución en las plumas era idéntica a la de los melanosomas negros presentes en las plumas de las aves vivientes. Además, gracias a los calamares fósiles sabíamos que la melanina podía fosilizar. Briggs empezó a rumiar la idea, pero no quedó del todo convencido hasta que mostró las imágenes a Prum, quien confirmó que a todos los efectos eran idénticos a los melanosomas.

Para reforzar la hipótesis de que los melanosomas pueden conservarse en los fósiles de las aves extintas, Briggs quiso encontrar otro ejemplo. Al indagar en los artículos publicados halló la descripción de una pequeña pluma del Cretácico descubierta en Brasil que conservaba varias bandas de color blanco y negro. Mi tutor pensaba que tendríamos la confirmación de nuestro hallazgo si demostrábamos que este espécimen también conservaba melanosomas solo en las bandas oscuras, puesto que las claras corresponderían a zonas carentes de pigmento. Conseguimos que nos prestaran el fósil y pudimos analizar el bloque entero bajo el microscopio electrónico. Hete aquí que, cuando examiné las bandas oscuras de esta pluma de 108 millones de años, pude distinguir miles de minúsculos melanosomas alineados a lo largo de las barbas. En cambio, cuando me desplazaba a las bandas claras no veía nada más que roca, que es justamente lo que uno esperaría si no hubiera pigmento.



ESTE FÓSIL de *Psittacosaurus* conserva una distribución de los pigmentos que delata un camuflaje del tipo denominado contrasombreado.

CORTESÍA DEL AUTOR Y BOB NICHOLLS

PINTAR POR NÚMEROS

Desde que publicamos el descubrimiento de los melanosomas en 2008, mi equipo y otros han descrito tales orgánulos y otros pigmentos en nuevos fósiles. También se ha comenzado a analizar químicamente la melanina fósil, extremo que ha confirmado nuestra hipótesis de su larguísima perdurabilidad, con una degradación mínima en el curso de millones de años. Junto a Caitlin Colleary, entonces estudiante de máster en la Universidad de Bristol, donde ahora trabajo, hemos comprobado que las leves alteraciones de la melanina fósil son motivadas por la exposición prolongada a las altas presiones y temperaturas que imperan a gran profundidad. Si bien algunos aún sostienen que son bacterias, cada vez cuentan con menos argumentos con que defender su escepticismo.

Uno de nuestros descubrimientos más espectaculares ha sido averiguar el color de los dinosaurios emplumados. En 2009, mi equipo de Yale en colaboración con Matthew Shawkey y Liliana D'Alba, ambos ahora en la Universidad de Gante, logramos reconstruir la librea de *Anchiornis huxleyi*, un pequeño carnívoro emplumado que vivió en China hace 155 millones de años. A semejanza del ave descubierta en Dinamarca que había estudiado, en el fósil de *Anchiornis* a simple vista se apreciaban manchas oscuras, indicadoras de la presencia de materia orgánica, quizá melanina. Pero éramos más ambiciosos, pues no solo pretendíamos confirmar la presencia de los melanosomas, sino reconstruir el plumaje entero, así que no podíamos confiar en que esas manchas nos dijesen todo lo que queríamos saber. Tuvimos que idear un método para predecir objetivamente el color a partir de la forma de los melanosomas. Para ello, lo estudiamos en sendas docenas de plumas negras, marrones y grises de aves vivientes. A partir de la longitud, la anchura, la relación entre ambas y la variación en la forma de los melanosomas y aplicando un método estadístico llamado análisis cuadrático discriminante, elaboramos un modelo predictivo del color de la pluma dotado con una precisión del 90 por ciento.

Cuando aplicamos el método a los melanosomas de *Anchiornis*, los resultados fueron sorprendentes. La predicción estadística nos decía que la mayor parte de su plumaje era gris. En cambio, las plumas largas de los brazos y de las patas no estaban pigmentadas por melanosomas y, por lo tanto, eran blancas salvo las puntas, que contenían orgánulos de ese tipo que pudimos determinar como de color negro. En las aves actuales es habitual el tener las puntas de las alas negras. La melanina, además de colorear las plumas, las hace más resistentes a las corrientes fuertes de aire. Quizá *Anchiornis* se benefició de ese fortalecimiento. Curiosamente las plumas de la coronilla (píleo) mostraban impresiones de melanosomas redondos («albóndigas») que le habrían dotado de una cresta rojiza. Semejante paleta de color lo convertía en un animal muy vistoso.

Por la misma época en que vio la luz nuestro estudio sobre *Anchiornis*, Fucheng Zhang, del Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología de Pekín; Michael J. Benton, de la Universidad de Bristol, y sus colaboradores publicaron el hallazgo de melanosomas fósiles en multitud de aves y dinosaurios recuperados en rocas de 130 millones de años de antigüedad

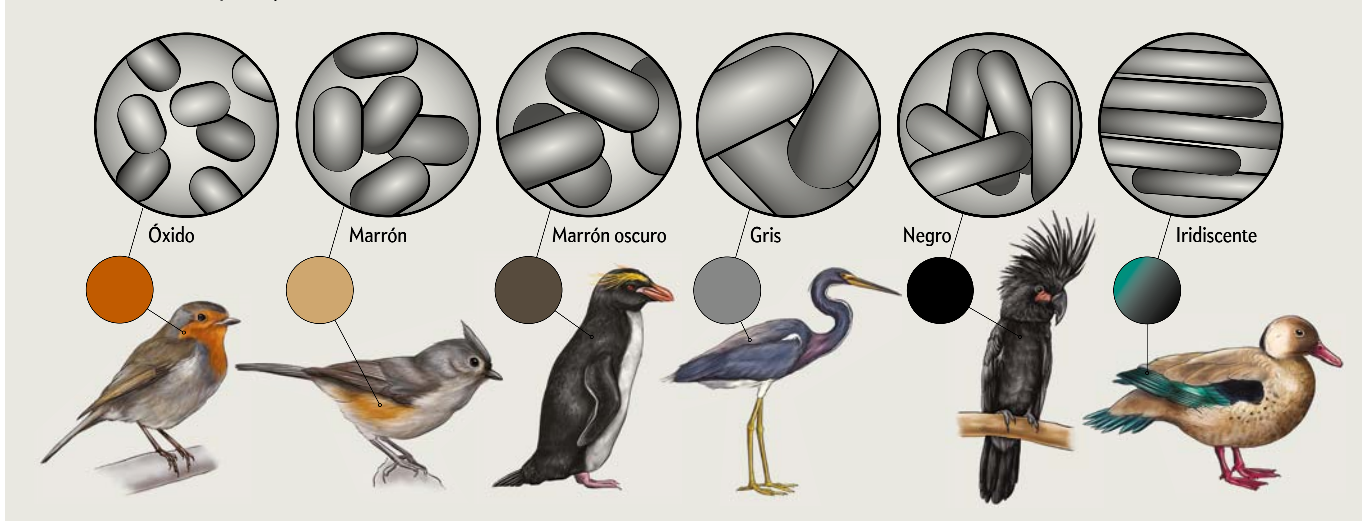
A todo color

Los microscópicos corpúsculos celulares que albergan los pigmentos, los melanosomas, pueden persistir en los fósiles durante decenas de millones de años. El estudio de tales pigmentos ha abierto la puerta a la reconstrucción del color real de una amplia diversidad de fauna extinguida, entre la que destacan algunos dinosaurios. Por primera vez los hallazgos no solo revelan su apariencia real, sino que esclarecen ciertos aspectos de la vida de estas especies que no conocíamos, desde sus ciclos de actividad hasta el tipo de ambiente en que se desenvolvían.

Caudipteryx *Anchiornis* *Sinosauropteryx*

El tamaño, la forma y la disposición de los melanosomas indican el color

Los melanosomas contienen dos formas de melanina: la eumelanina, que da lugar a los tonos negros, y la feomelanina, que confiere tonos rojos oxidados. Las combinaciones de ambas y la ausencia de pigmento crean colores pardos, grises y blancos. Por otra parte, la iridiscencia proviene de la disposición en capas de los melanosomas, que refractan la luz. El análisis de los melanosomas presentes en las plumas de las aves actuales ofrece información con la que es posible deducir colores y libreas de animales extintos en virtud del tamaño, la forma y la disposición de los melanosomas fósiles.



Destacar

Los melanosomas conservados en un pequeño dinosaurio denominado *Microraptor* nos revelan que estaba cubierto por un plumaje negro llamativo e iridiscente similar al de un cuervo. Los paleontólogos creían que era un animal nocturno por el gran tamaño de sus cuencas oculares. Pero las aves iridiscentes actuales suelen ser diurnas, lo que sugiere que *Microraptor* en realidad compartía ese mismo hábito.

Microraptor

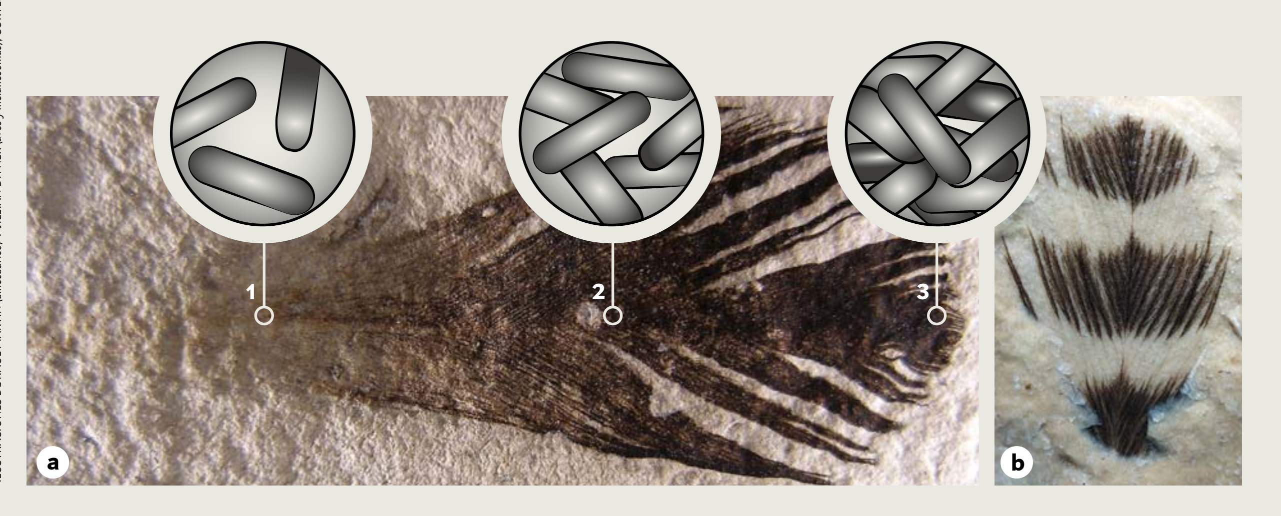
Camuflarse

Los melanosomas conservados en un fósil de *Psittacosaurus* muestran que su dorso era oscuro y su vientre claro. Este patrón, denominado contracoloración o contrasombreado, es común en la fauna actual y facilita la ocultación de cazadores y presas por igual. El contrasombreado propio de *Psittacosaurus* indica que se habría mimetizado mejor en un ambiente con luz solar difusa, como el que impera en un bosque frondoso.

Psittacosaurus

La densidad y la distribución de los melanosomas indican el patrón

Las plumas fósiles muestran cómo las diferentes concentraciones de melanosomas crean patrones. Por ejemplo, este fósil de hace 55 millones de años descubierto en Dinamarca **a** presenta un patrón gradual que abarca desde bajas concentraciones de melanosomas que producen colores apagados (*1*), a concentraciones intermedias que dan como resultado tonalidades medias (*2*) y altas concentraciones que generan tonos intensos (*3*). En una pluma fósil de hace 108 millones de años hallada en Brasil **b**, las bandas oscuras y claras son el resultado de la alternancia de zonas ricas y carentes de melanosomas.



ILUSTRACIONES DE RAÚL MARTÍN (*dinosaurios*) Y JILLIAN DITNER (*aves y melanosomas*); CORTESÍA DEL AUTOR (*fotografía de pluma*)

en China. El patrón de melanosomas redondos que cubría al emplumado *Sinosauropteryx* indica que habría lucido una cobertura rojiza y cola a rayas, por lo que es el primer dinosaurio que sabemos anaranjado.

Desde aquellos inicios, los datos recopilados por nuestro equipo han crecido hasta abarcar varios cientos de plumas distintas; algunas nos permiten asegurar que eran iridiscentes, el brillo metálico con el que resplandece el plumaje del colibrí y el pavo real, entre otros. Los melanosomas responsables de ese efecto tienden a ser más alargados que los normales, pudiendo ser incluso huecos o aplanados. La iridiscencia aparece por la acumulación de los melanosomas en la pluma. Ciertas configuraciones reflejan la luz de tal forma que crean colores diversos dependiendo del ángulo desde el que veamos al animal o de cómo incida la luz.

Nuestra sorpresa fue mayúscula cuando en 2009 hallamos indicios de iridiscencia en una pluma fósil de 49 millones de años procedente del yacimiento de Messel, Alemania. El fósil se guarda en el Museo Senckenberg de Frankfurt y conserva la configuración original de los melanosomas causante de su iridiscencia. Se encuentran apiñados en una capa densa y lisa en las ramificaciones más finas de las plumas: las barbillas. Aparecen concentrados en el extremo y el envés de la pluma, las únicas partes que no quedan cubiertas por las demás plumas superpuestas. Hemos deducido que las puntas eran iridiscentes porque sabemos que esta configuración de los melanosomas produce el fenómeno que se denomina interferencia en láminas delgadas, análogo a lo que sucede cuando una mancha de gasolina flota en el agua y vemos un arcoíris de vivos colores.

No pasó mucho tiempo antes de que descubriéramos pruebas de iridiscencia en un auténtico dinosaurio, un animal de la talla de un cuervo hallado en China y provisto de alas en las cuatro extremidades. Pariente próximo del *Velociraptor* de *Parque Jurásico*, se denomina *Microraptor*. Aunque en la película el primero luce piel escamosa, ahora sabemos que ambos estaban cubiertos de plumas. En *Microraptor* estas conservan los melanosomas alargados, bacilares, organizados para reflejar la luz de manera llamativa. Probablemente debió ser negro y dotado del mismo brillo metálico característico de los cuervos. Ahora sabemos que no fue la única especie extinta que hacía gala de ese colorido brillante. Hace poco, Jennifer Peteya, de la Universidad de Akron, y Shawkey, de la Universidad de Gante, han descubierto la misma coloración en otro fósil chino, *Bohaiornis*, un ave enantiornítida dotada de dos colas muy largas.

ALGO MÁS QUE LA PIEL

Además de posibilitar que paleontólogos y artistas recreen con más fidelidad estos seres, los pigmentos fósiles revelan facetas desconocidas de la vida cotidiana de los dinosaurios y de otra fauna desaparecida en el pasado remoto. Por ejemplo, los expertos habían deducido que *Microraptor* era un animal de hábitos nocturnos por sus grandes cuencas oculares. En cambio, nuestro descubrimiento de que poseía un plumaje iridiscente apunta en sentido contrario, puesto que en la avifauna actual esa coloración es típica de las especies diurnas. Los colores brillantes de *Anchiornis* también pudieron servir para el cortejo u otro tipo de exhibición, tal y como vemos hoy en las aves vistosas. Así, los patrones de color pueden servir para corroborar hipótesis sobre el comportamiento de una especie mediante una cadena de argumentos y pruebas poco habitual.

Los melanosomas fósiles también ayudarían a ubicar algunos organismos enigmáticos en el árbol evolutivo. Hace poco, junto con mis colaboradores, resolvimos la gran incógnita que envolvía un fósil de 300 millones de años apelado el monstruo de Tully, cuyo primer ejemplar salió a la luz en Illinois en 1955. Su extraño aspecto desafiaba todo intento de clasificación: cuerpo vermiforme, ojos pedunculados como los del caracol y boca con forma de garra. A tenor de su cuerpo blando, algunos le supusieron lazos con los moluscos, otros en cambio lo encuadraron entre los gusanos segmentados, o entre los redondos, y hubo quien lo clasificó con los artrópodos (el fecundo grupo que engloba los insectos y los crustáceos, entre otros). Nuestro estudio de dos especímenes reveló la presencia de melanosomas en la retina. Varios grupos zoológicos se sirven de la melanina para proteger esa parte vital del ojo, pero la retina del monstruo mostraba una disposición peculiar a base de capas de melanosomas redondeados y alargados, un rasgo privativo de los vertebrados. Así, gracias a los pigmentos fósiles, lo situamos en la rama evolutiva de este gran grupo animal.

La pigmentación fosilizada de una especie también puede ilustrar sus relaciones ecológicas con otras. En los insectos, la mayoría de los colores no obedecen al propósito de atraer una pareja, sino a tácticas de camuflaje para no ser devorado, por lo que sus pigmentos nos pueden aportar pistas sobre sus depredadores. Los fósiles de los neurópteros (crisopas y afines) nos ofrecen un ejemplo fascinante. Hace entre 170 y 150 millones de años aparecieron por primera vez algunos patrones de color muy distintivos en los insectos. Quizás el más llamativo de todos sean los ocelos, una mancha circular de aspecto parecido a un ojo de otro animal que sirve para engañar a los depredadores que se abalanzan a gran velocidad desde la distancia. Los neurópteros parecen estar entre los primeros en lucirlos. ¿Contra qué tipo de cazador? La mayoría de los colores actuales han evolucionado como defensa contra las aves, sus principales depredadores hoy en día. Pero los ocelos de los neurópteros preceden a su aparición, por lo que probablemente sus enemigos fueron un pequeño grupo contemporáneo de dinosaurios llamados Paraves, considerados los antecesores de las aves. Hasta la fecha, el registro fósil de Paraves no ha permitido deducir el momento en que alzaron el vuelo, pero la presencia de ocelos en los neurópteros delata que algunos dinosaurios paravianos ya volaban y estaban ejerciendo una presión evolutiva sobre los insectos dándoles caza del mismo modo que los pájaros.

Otros descubrimientos de fósiles con melanosomas nos han permitido a mis colaboradores y a mí deducir el ambiente en que vivió un animal extinto. Nuestra primera incursión en este campo comenzó con un fósil particularmente bien conservado de un herbívoro llamado *Psittacosaurus*, un pariente de *Triceratops*. Sus esqueletos son bastante abundantes en el noreste de China y en ocasiones aparecen casi completos. Este fósil resultó ser una joya para la empresa. Su cuerpo estaba cubierto por una fina película: restos de piel que conservaban sus delicadas escamas. La cola mostraba unos filamentos alargados que podían ser precursores de las plumas. Los descubrimientos anteriores de plumas de dinosaurio proceden en su mayoría de carnívoros del grupo de los terópodos. Los filamentos de *Psittacosaurus*, perteneciente al grupo de los ceratópsidos herbívoros, alejado evolutivamente de los anteriores, sugiere que el plumaje pudo ser un rasgo mucho más común entre los dinosaurios de lo que se pensaba.

Cuando examiné el fósil por primera vez en 2009, al año siguiente de nuestro anuncio del hallazgo de los melanosomas en aves fósiles, constaté enseguida que conservaba vestigios de hermosos patrones de color sobre todo su cuerpo. Sutiles, eso

sí; una suerte de vetas finas, puntos y rayas. También pude ver que su dorso era oscuro y el vientre más claro. Ese gradiente de oscuro a claro que desciende desde la parte superior del cuerpo hasta la inferior contrarresta el gradiente de luz a sombra que crean los rayos solares. Este patrón, conocido como contracoloración o contrasombreado, es común en la fauna actual, desde los delfines hasta los ciervos; cazadores y presas se sirven por igual de él para camuflarse y pasar desapercibidos.

Por casualidad enseñé el esbozo de *Psittacosaurus* a Innes Cuthill, miembro de un equipo que estudia el camuflaje en la Universidad de Bristol. Solo entonces reparamos en la oportunidad que este dinosaurio nos brindaba: no solo estudiar su contrasombreado, sino también deducir el ambiente donde vivió. Cuando se quiere reconstruir el hábitat de un animal, casi siempre se recurre a los indicios que ofrecen otros fósiles animales y vegetales hallados en las cercanías. Pero este método no es infalible, pues muchas veces el yacimiento donde se descubre un fósil no refleja exactamente el lugar donde vivió. Por ejemplo, el psitacosaurio hallado en China fue recuperado en los sedimentos de un antiguo lago. Pero no era acuático, por lo que sus restos debieron ser arrastrados desde las inmediaciones, quizá por una corriente de agua. Nuestro estudio podía suministrar pistas sobre ese ambiente y conocer las condiciones concretas de luz en que este dinosaurio desarrolló su camuflaje.

Cuthill y su equipo habían estudiado recientemente el contrasombreado en los ungulados modernos, el grupo que engloba a caballos, antílopes, camellos, cerdos y rinocerontes. Por definición, el contrasombreado implica una coloración más oscura en el dorso y más clara en la parte inferior (con excepciones, como las orugas, que viven boca abajo). La intensidad de esos tonos y la transición de oscuro a claro difieren entre las especies. El equipo de Cuthill quiso investigar si había una relación entre dicha variación y las condiciones lumínicas que predominan en cada entorno. La intensidad de la luz solar depende de la latitud, así como de la densidad de la vegetación. Por ello pronosticaron que el contrasombreado de los ungulados también podía diferir en virtud de ambos parámetros, una hipótesis que sus resultados sustentan. En general, si un animal vive en ambientes abiertos, los rayos solares crearán una sombra en la parte inferior del cuerpo, con una transición muy marcada con respecto a las zonas iluminadas. La fauna de esos entornos suele exhibir un contrasombreado coincidente: dorso oscuro y, bruscamente, tonos más claros en el vientre, sin gradiente intermedio entre ambos. El berrendo o antílope americano es un ejemplo de este tipo de contrasombreado. En cambio, en los hábitats frondosos donde la densa vegetación filtra y dispersa la luz en todas direcciones, solo surgen sombras en la parte más baja del cuerpo y la transición desde la zona iluminada es gradual. Los ciervos de cola blanca o cola negra, tan comunes en los bosques de Norteamérica, muestran ese patrón.

Gracias al examen visual del fósil de *Psittacosaurus* sabíamos que su camuflaje era contrasombreado. Pero para identificar el tipo de patrón cromático con mayor precisión, tuvimos que recurrir a diversas técnicas de imagen para cartografiar la distribución de la melanina. Después aplicamos el patrón de pigmento a un minucioso modelo a escala natural del dinosaurio, con la ayuda del «paleoartista» británico Bob Nicholls. Gracias a esta reconstrucción averiguamos que la transición de claro a oscuro se situaba muy abajo en el vientre y en la cola.

Para comprobar si semejante distribución del color funcionaba bien, pintamos una segunda copia del modelo a escala real con un gris uniforme. Después, para captar las diversas sombras producidas, lo fotografiamos bajo distintas condiciones de luz, desde un día radiante a otro completamente encapotado, así como en llanuras abiertas o bajo las copas en un bosque de coníferas. A continuación invertimos los tonos claros y oscuros de las fotografías para crear los patrones ideales de camuflaje en cada una de las condiciones de luz. Por último, comparamos la reconstrucción cromática del *Psittacosaurus* con los patrones de contrasombreado idealizados y determinamos que se habría camuflado mejor en un hábitat con luz difusa, como la que predomina en un bosque cerrado.

UN FUTURO EN COLOR

Los científicos aún tenemos mucho que aprender sobre los «paleocolores». Nuestra capacidad para deducir la coloración a partir de los restos fósiles gracias a la forma y a la disposición de los melanosomas supone un paso de gigante con respecto a lo que sabíamos apenas hace diez años. Pero hay otros pigmentos que podemos buscar, como los carotenoides, que imprimen rojos brillantes y amarillos, o las porfirinas, que crean verdes, rojos y azules. Ya existe constancia de la presencia de alguno de esos pigmentos. Se han descubierto carotenoides en bacterias fósiles datadas en varios eones. Se han hallado porfirinas en un mosquito cebado con sangre de hace 46 millones de años y en los huevos de un ovirraptosaurio de 66 millones. También se han encontrado pigmentos desconocidos en seres vivos que han pervivido hasta hoy, como en fósiles de lirios de mar y de algas, de entre 300 y 150 millones de años.

Es probable que debamos asumir ciertas limitaciones a la hora de reconstruir la coloración del pasado con detalle, ya que en el larguísimo lapso transcurrido se habrá perdido sin remedio parte de la información. Además, dada la rareza de los fósiles que conservan las partes blandas y su enorme valor intrínseco, será forzoso limitar el muestreo químico destructivo. Pero, sin duda, a medida que avancen las técnicas de análisis, aparecerán nuevos datos que cambiarán nuestra comprensión del pasado con una rapidez pasmosa. Cada avance nos acercará al aspecto real de los dinosaurios y de otros animales prehistóricos, con toda la plenitud de su colorido. IyC

PARA SABER MÁS

The colour of fossil feathers. Jakob Vinther et al. en *Biology Letters*, vol. 4, n.º 5, págs. 522-525, 23 de octubre de 2008.
3D camouflage in an ornithischian dinosaur. Jakob Vinther et al. en *Current Biology*, vol. 26, n.º 18, págs. 2456-2462, 26 de septiembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fósiles con restos de vida. Mary H. Schweitzer en *IyC*, febrero de 2011.
Origen y evolución de las aves. Stephen Brusatte en *IyC*, marzo de 2017.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

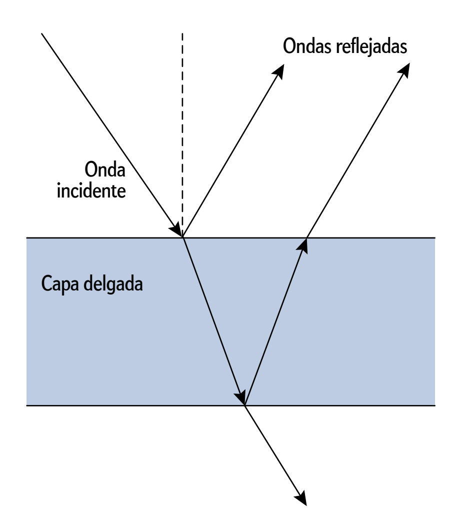
Joyas vivas

Numerosos insectos resplandecen a la luz del sol con un brillante color metálico. Este no proviene de pigmentos, sino de las delgadas estructuras nanométricas que componen el caparazón y las alas

Muchos encuentran las moscas molestas y apenas se dignan a mirarlas. Quien, en cambio, se fija en ellas con atención descubre la riqueza de colores con que estos y otros insectos a menudo destacan en el entorno, como piedras preciosas que se arrastran y zumban. El efecto resulta tan convincente que, por ejemplo, a las moscas califóridas se las conoce popularmente como moscas verdes o azules. Su brillo a la luz del sol cambia en función de la perspectiva: si las contemplamos desde ángulos de incidencia pequeños, lucirán de dorado a verdoso; vistas de lado, sin embargo, dominarán las longitudes de onda más cortas y, por lo tanto, los tonos azules.

No estamos acostumbrados a ver semejante variabilidad ni dicho brillo metálico en los colores corrientes. Por lo general, estos se producen simplemente debido a ciertas sustancias químicas que absorben determinadas longitudes de onda de la luz blanca y dispersan los colores complementarios. Así, el color verde de las plantas obedece a la clorofila, que absorbe sobre todo el azul y el rojo, mientras que los diferentes tonos marrones de la piel y el cabello humanos dependen de la concentración de otro pigmento, la melanina.

En cambio, en el caso de los insectos hemos de vérnoslas con complejos procesos ópticos. Aquí intervienen los efectos de interferencia que tienen lugar cuando la luz se refleja y se refracta repetidas veces en el interior de una estructura de grosor microscópico, razón por la que hablamos también de «colores estructurales». En ocasiones estos aparecen junto con tonos debidos a pigmentos, lo que genera la mezcla de efectos correspondiente. Por ejemplo, si la estructura en la superficie de un objeto genera un color de interferencia azul y, además, contiene pigmentos amarillos, observaremos un tono verdoso.

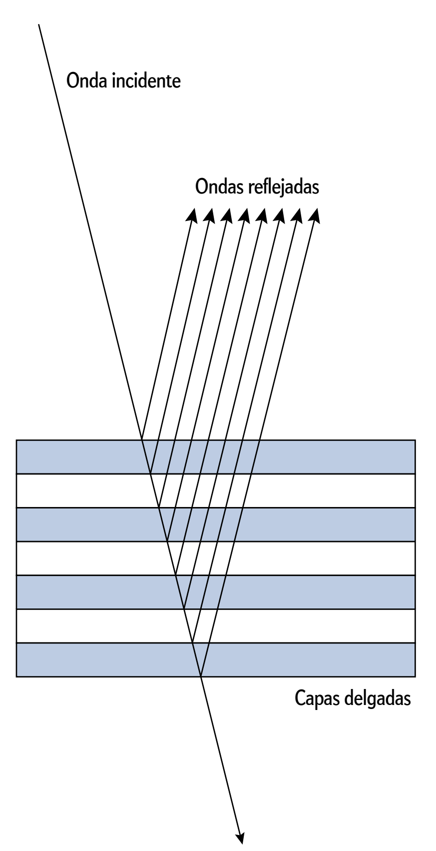


CUANDO LA LUZ llega a la delgada ala de una mosca, la onda se refracta en su interior y se refleja parcialmente en las dos interfaces (*flechas*). Para ciertas longitudes de onda, este fenómeno puede generar notables efectos cromáticos.

Estructura y color

En el caso de los insectos, la luz del sol interacciona con capas individuales cuyo grosor es de un orden de magnitud similar a la longitud de onda de la luz visible, lo que en última instancia modifica la intensidad de cada uno de los colores. Incluso una sola capa delgada y transparente puede brillar con vivos colores.

Cuando la luz alcanza la filigrana transparente de las alas de una mosca, una parte se refleja y otra se refracta en el interior como consecuencia de las diferentes propiedades ópticas del aire y del material del ala. En la parte reflejada se produce un desplazamiento de media longitud de onda, lo que quiere decir que las crestas de la onda se tornan valles, y viceversa. El resto de la luz incide sobre la capa límite inferior, donde se refleja de nuevo parcialmente (si bien ahora no hay desplazamiento de la longitud de onda, ya que este solo tiene lugar durante la transición a un medio más denso). Esta componente reflejada viaja en la misma dirección que la de la capa superior, de



EL EXOESQUELETO DE LOS INSECTOS se compone de múltiples capas de espesor nanométrico (*azul*) separadas por finas películas de aire (*blanco*). Al reflejar la luz, esta estructura puede intensificar el efecto de que produciría una sola capa (por simplicidad, la figura no indica el cambio de dirección de las ondas luminosas debido a la refracción en cada una de las capas).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN JOACHIM SCHLICHTING



EL CUERPO DE LAS MOSCAS CALIFÓRIDAS puede brillar en tonos azulados, verdes y dorados dependiendo del ángulo de observación.

© MOONFLASH-LONDON/ISTOCKPHOTO

modo que se superpone con ella en el ojo o en los sensores de nuestras cámaras fotográficas.

Debido a la diferencia en el camino recorrido por las ondas parciales, surge entre ambas una diferencia de fase. De manera gráfica, esto significa que las crestas de una onda se trasladan con respecto a las de la otra. La combinación de ambos desplazamientos (el de media longitud de onda que sufre la onda reflejada en la capa superior, y el debido a la diferencia de camino óptico) hace que la superposición de ambas ondas dé lugar a un nuevo efecto cromático. Este depende del espesor del ala, del índice de refracción del material que la compone, del ángulo de incidencia y de la longitud de onda de la luz.

Si el espesor de la capa coincide con una cuarta parte de la longitud de onda de un determinado color, la doble ruta en el material y el desplazamiento de la reflexión superior suman exactamente una longitud de onda completa, lo que genera una interferencia constructiva. Esto provoca que las crestas se hagan más altas y los valles más profundos, por lo que el color correspondiente aparecerá notablemente más saturado e intenso. Las demás longitudes de onda, en cambio, se cancelan parcial o completamente. Por tanto, con la luz blanca del sol, que contiene todos los colores, en un punto del ala y con un determinado ángulo de observación, siempre veremos un solo tono. Cualquier diferencia de color permite deducir una variación en el espesor del ala.

Capas múltiples

El colorido brillo metálico del cuerpo de la mosca proporciona, asimismo, un ejemplo de color estructural. Esto puede sorprendernos en primera instancia, ya que, al fin y al cabo, el exoesqueleto (la dura capa externa) es mucho más grueso que el ala. Sin embargo, la superficie del cuerpo de la mosca verde se encuentra formada por un conjunto ordenado de capas paralelas de quitina, transparentes y de unos 150 nanómetros de espesor, separadas entre sí por finas películas de aire unas diez veces más delgadas. Las irregularidades de las láminas de quitina actúan como diminutos separadores y generan los espacios intermedios.

Cuando la luz atraviesa esta pila de capas, cada una de ellas contribuye a la interferencia constructiva. Como resultado, del tronco de la mosca verde emanan colores aún más intensos que los producidos por una sola capa delgada, y mucho más que los generados por pigmentos.

En numerosos insectos, la estructura del exoesqueleto difiere en distintas zonas del cuerpo. Eso provoca que en cada punto se intensifique una componente del espectro de la luz blanca, de modo que el animal se nos muestra con múltiples colores. Un espécimen magnífico que hace gala de intensos colores estructurales es la avispa dorada, o avispa cuco, de la familia de los crisídidos, cuyo fascinante aspecto no parece encajar con su estilo de vida parasitario.

Los biólogos aún especulan sobre la razón de ser de los llamativos colores de muchos insectos. Podrían servir para la comunicación entre individuos de una misma especie, pero también para indicar a los depredadores que no son comestibles. Con todo, puede que se trate de un fenómeno meramente casual, generado por una estructura que bien podría tener una finalidad distinta, como la regulación de la temperatura.

Sea como fuere, incluso los científicos de otras disciplinas han acabado interesándose por los colores estructurales de estos animales y tratan de comprenderlos mejor. Y no solo por su belleza, sino porque constituyen también una rica fuente de inspiración para numerosas aplicaciones en nanotecnología.

EN NUESTRO ARCHIVO

Caprichos de la reflexión. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, junio de 2010.

Trucos cromáticos de la naturaleza. Philip Ball en *IyC*, julio de 2012.

por Jean-Paul Delahaye

Jean-Paul Delahaye es profesor emérito de la Universidad de Lille y miembro del Centro de Investigación en Informática, Señal y Automática de Lille.



Lo veo, lo demuestro... pero ¿lo entiendo?

Una de las cuestiones más fascinantes de las matemáticas es que albergan innumerables verdades que son, al mismo tiempo, sencillas e inesperadas. En esta columna analizaremos ocho ejemplos sorprendentes

El razonamiento matemático no se reduce a un simple cálculo en el que se prevé el resultado y se conocen de antemano todos los límites: en ocasiones se producen «milagros». A continuación presentamos ocho pequeños enigmas y sus soluciones, las cuales parecerán inesperadas, absurdas o inverosímiles. Todos ellos nos harán descubrir una propiedad sencilla que, bien explotada, nos permitirá alcanzar algo que parecía imposible o nos enfrentará a una afirmación muy alejada de lo que podíamos imaginar.

Milagro 1: ¿Conoce bien la raíz de 2?
Solo de cabeza (sin utilizar ordenador, lápiz, papel o teléfono inteligente) encuentre la cifra decimal que ocupa la posición 200 después de la coma del número $(1 + \sqrt{2})^{1000}$.

Respuesta: Comencemos observando que el número

$$(1 + \sqrt{2})^{1000} + (1 - \sqrt{2})^{1000}$$

es un entero, ya que, cuando lo desarrollamos, todos los términos que incluyen $\sqrt{2}$ se anulan entre sí. Así ocurre, por ejemplo, con el exponente 2:

$$(1 + \sqrt{2})^2 + (1 - \sqrt{2})^2 = 1 + 2\sqrt{2} + 2 + 1 - 2\sqrt{2} + 2 = 6 .$$

Por otro lado, el número $(1 - \sqrt{2})^{1000}$ es muy pequeño, ya que equivale a un número menor que 1/2 elevado a 1000. Puesto que $2^{10} = 1024$, podemos ver que:

$$(1 - \sqrt{2})^{1000} < 1/2^{1000} = 1/1024^{100} < 1/(10^3)^{100} = 1/10^{300} .$$

El número que figura en el enunciado es entonces la diferencia entre un número entero y otro menor que 0,000...0001, con 299 ceros después de la coma. Todas sus cifras entre la coma y la posición 300 son, por tanto, nueves.

Este pasatiempo pertenece a una sección de problemas firmada por Elwyn Berlekamp y Joe Buhler que apareció en el número de otoño de 1999 del boletín *Emissary*, una publicación del Instituto de Investigación de Ciencias Matemáticas de la Universidad de California en Berkeley.

Milagro 2: Suma de cifras
La maga de los números le dice: «Tome un número entero cualquiera formado por cifras no decrecientes de izquierda a derecha y cuyas dos últimas cifras sean distintas entre sí (por ejemplo, 1.333.456.778). Multiplíquelo por 9». Después añade: «Sé la suma de los dígitos del resultado». ¿Por qué?

Respuesta: La razón se debe a que tal suma siempre da 9. En nuestro ejemplo, 9 × 1.333.456.778 = 12.001.111.002, cuyos dígitos suman 9. Se trata de algo totalmente inesperado, ya que el número de partida puede ser muy largo y el que se obtiene al multiplicarlo por 9 lo será más aún.

La demostración de este curioso resultado se basa en el método de sustracción que aprendimos en la escuela. Consideremos un número entero N de 6 dígitos (el método se extiende con facilidad a cualquier número de dígitos):

$$N = a_1a_2a_3a_4a_5a_6 ,$$

con $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4 \leq a_5 \leq a_6$.

El número $9N$ es igual a $10N - N$. Esta sustracción puede escribirse como:

$$\begin{array}{rcccccccl} & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & 0 & \quad 10N \\ - & & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & \quad -N \\ \hline & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & \quad 9N \end{array}$$

LA PRUEBA DEL NUEVE

El resto de la división por 9 de un entero positivo *n*, denominado «*n* módulo 9», reviste gran utilidad para detectar errores en algunas operaciones. Puede calcularse sumando los dígitos de *n* y repitiendo la operación si el resultado es superior a 9 (si obtenemos 9, el resto de la división por 9 es 0). Para 35.581.929, por ejemplo, calcularíamos 3+5+5+8+1+9+2+9 = 42 y 4+2 = 6. Por tanto, 35.581.929 módulo 9 es igual a 6. Para ver por qué, basta con observar que 10^n = 99...9 + 1; es decir, igual a 1 módulo 9.

La «prueba del 9» de una multiplicación consiste en verificar que el valor módulo 9 del resultado coincide con el producto de los factores módulo 9. El método funciona con las adiciones, las sustracciones y las divisiones.

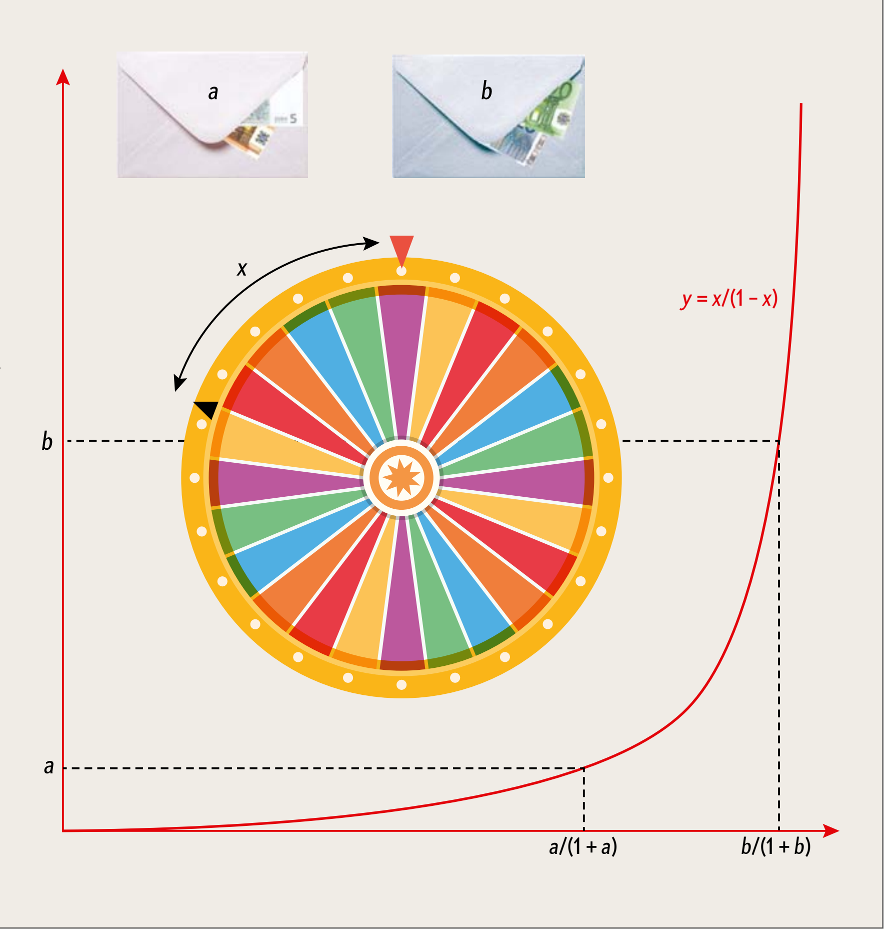
Supongamos que deseamos verificar el resultado de la operación 2537 × 823 = 2.087.951. Para ello, primero calculamos los valores módulo 9 de los factores: 2537 nos da 2+5+3+7 = 17, que a su vez nos da 8; y 823 nos da 8+2+3 = 13, que da 4. El producto de ambos es 32, que es igual a 5 módulo 9. Por tanto, lo mismo tendría que aplicarse al resultado: y, en efecto, 2+0+8+7+9+5+1 = 32, igual a 5 módulo 9. La operación es entonces probablemente correcta. Con todo, nunca podremos estar completamente seguros, ya que siempre es posible cometer un error que, por casualidad, dé lugar al mismo resultado.

LA ELECCIÓN DEL SOBRE

Suponga que debe elegir entre dos sobres con sendas sumas de dinero, *a* y *b*, diferentes ($a < b$) y desconocidas. Usted toma un sobre, lo abre y comprueba cuánto dinero hay en él. Si se lo permitieran, ¿lo cambiaría por el otro?

Por sorprendente que parezca, existe una estrategia para ganar en más del 50 por ciento de las ocasiones. Para ponerla en práctica, una posibilidad consiste en generar un número aleatorio *x* entre 0 y 1 (por ejemplo, con ayuda de una ruleta, *véase la figura*) y transformarlo mediante la función $x/(1-x)$, la cual asocia de manera biyectiva un número real comprendido entre 0 e infinito a cada uno de los puntos del intervalo [0, 1]. También podríamos usar otra función continua y biyectiva, si bien ello alteraría la probabilidad de escoger el sobre con más dinero.

La idea se basa en considerar el número $y = x/(1-x)$ como un «umbral de ganancia». Si al abrir el sobre comprobamos que su contenido es inferior a *y*, lo cambiaremos; en caso contrario, nos quedaremos con él. Esta estrategia nos garantiza que habremos tomado la decisión correcta en todos los casos en los que $a < y < b$. Puede demostrarse que, al incluir los casos en los que *y* es mayor o menor que *a* y *b*, la probabilidad de escoger el sobre correcto es siempre estrictamente mayor que 1/2.



La cifra b_7 vale, debido al acarreo, $10 - a_6$.

La cifra b_6 vale $a_6 - a_5 - 1$, donde hemos tenido en cuenta el acarreo anterior. La hipótesis de que $a_6 > a_5$ nos asegura que no hay nuevos acarreos en la siguiente columna.

La cifra b_5 vale $a_5 - a_4$, ya que $a_5 \geq a_4$ nos garantiza que no hay acarreo. De la misma manera, $b_4 = a_4 - a_3$, $b_3 = a_3 - a_2$, $b_2 = a_2 - a_1$, y $b_1 = a_1$. La suma de los dígitos de $9N$ es, por tanto:

$$(10 - a_6) + (a_6 - a_5 - 1) + (a_5 - a_4) + (a_4 - a_3) + (a_3 - a_2) + (a_2 - a_1) + a_1 = 10 - 1 = 9\ .$$

El descubrimiento de este pequeño pero bello resultado parece deberse a Felix Lazebnik, de la Universidad de Delaware, quien lo publicó en 2014.

Milagro 3: ¿Un número excepcional? La maga de los números desea sorprenderle de nuevo. Pone sobre la mesa un vaso de vidrio con un pañuelo arrebujado en su interior. Le da un papel y un lápiz y le pide que seleccione un número *N* de cuatro cifras que no sean todas iguales (por ejemplo, el número 3333 no está permitido).

A continuación le dice: «Reordene las cifras de *N* en orden creciente. Obtendrá un número *X* de cuatro dígitos. Después, reordene de nuevo los dígitos de *N* pero en orden decreciente, lo que le dará un número *Y*, también de cuatro dígitos. Calcule $Z = Y - X$. Vuelva a repetir las mismas operaciones con el número *Z*. Continúe con el proceso hasta que resulte inútil, porque el número obtenido sea siempre el mismo».

Usted hace lo que le pide la maga, quien entonces extrae el pañuelo del vaso y lo despliega. En él puede leer el número 6174: el número *Z* que había encontrado. ¿Cómo es posible?

Respuesta: Para cualquier número inicial, el proceso acabará siempre en 6174. No he sido capaz de llegar a este resultado de manera razonada. Sin embargo, como se trata de una propiedad verificable en un número finito de pasos, consistentes en considerar todos los números posibles de cuatro cifras, escribí un pequeño programa de ordenador para asegurarme de que el procedimiento siempre acababa en 6174. Esta prueba por ordenador, aunque un tanto decepcionante, no deja lugar a dudas.

He aquí alguna información adicional sobre esta peculiaridad de los números de cuatro cifras que, a día de hoy, sigue sin una explicación profunda o general. Esta propiedad del número 6174 podría ser una simple coincidencia fruto del azar.

- Ningún número distinto de 6174 da como resultado él mismo cuando se le aplica el procedimiento expuesto.
- El número máximo de pasos para llegar a 6174 es 7. Esto es, por ejemplo, lo que sucede con 1400, que proporciona sucesivamente los números 4086, 8172, 7443, 3996, 6264, 4176, 6174.

• El número medio de pasos para llegar a 6174 es 4,7. El número de pasos toma todos los valores posibles entre 0 (para 6174) y 7. El número X_N de enteros de cuatro dígitos que requieren N pasos de cálculo viene dado por: $X_0 = 1$, $X_1 = 356$, $X_2 = 519$, $X_3 = 2124$, $X_4 = 1124$, $X_5 = 1379$, $X_6 = 1508$, $X_7 = 1980$.

El mismo milagro se produce cuando partimos de un número de tres cifras no todas iguales, lo que conduce invariablemente al número 495. Al igual que antes, hasta ahora nadie ha sido capaz de ir más allá de la mera constatación del fenómeno. Nos encontramos así frente a una situación en la que conocemos el resultado inesperado a fuerza de cálculo, pero que en el fondo no entendemos.

El misterio es aún más profundo, ya que, si tratamos de repetir lo mismo partiendo de un número de cinco cifras, la cosa deja de funcionar: todos los números derivan en ciclos (no puede ser de otra manera), aunque no necesariamente en el mismo.

Esta maravillosa propiedad de los números 6174 y 495 fue descubierta por el matemático indio Dattatreya Kaprekar en 1949.

Milagro 4: La potencia 2^{29} de Lenstra

Como en el caso del primer milagro, aquí se nos pide responder sin usar ordenador, lápiz, papel ni teléfono inteligente: sabiendo que 2^{29} contiene 9 cifras diferentes de las 10 posibles, ¿cuál es la que falta?

No hace falta ser un calculador mental prodigioso que realmente compute 2^{29}. Aunque aparenta ser imposible, la información del enunciado permite encontrar la respuesta.

Respuesta: Para $n = 1, 2, 3...$ el número 2^n módulo 9 (*véase el recuadro* «La prueba del 9») es sucesivamente 2, 4, 8, 7 (porque 16 nos da $1 + 6 = 7$), 5 (porque 32 nos da $3 + 2 = 5$), 1 (porque 64 nos da 10, que a su vez nos da 1) y de nuevo 2, 4, 8, 7, 5, 1 cíclicamente. Puesto que $29 = 6 \times 5 - 1$, podemos deducir que 2^{29} módulo 9 vale 5.

Sabemos además que todas las cifras del 0 al 9, excepto una, están presentes. Si estuviesen todas, el valor de 2^{29} módulo 9 sería el de la suma $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 45$; es decir, 0 módulo 9. Solo la eliminación del 4 nos da un total igual a 5 módulo 9. Esta es, por tanto, la cifra que falta. Algo que podemos verificar sin despeinarnos con ayuda de una máquina, la cual nos confirmará que $2^{29} = 536.870.912$.

Este problema se debe al célebre matemático neerlandés Hendrik Lenstra, especialista en algoritmos de factorización de enteros.

Milagro 5: Una estrategia increíble

Tiene usted ante sí dos sobres, cada uno con una suma diferente de dinero. Abre uno de ellos y mira su contenido. Ahora debe elegir entre dicho sobre o el otro, cuyo contenido desconoce. Por increíble que parezca, existe una estrategia que permite acertar el sobre con la mayor cantidad de dinero en más del 50 por ciento de las veces.

Esto parece absurdo, ya que hemos abierto uno de los sobres, pero no sabemos nada en absoluto del otro. ¿Cómo es posible?

Respuesta: Una forma de proceder es la siguiente:

• Elegir al azar y de manera uniforme un número real x entre 0 y 1. Podemos proceder, por ejemplo, haciendo girar una ruleta cuya circunferencia mida un metro y en cuyo borde hayamos dibujado una marca. Una vez que la ruleta se detenga, podremos medir sobre el perímetro la distancia x entre la marca y el punto en el que se paró la ruleta.

• Calcular $y = x/(1 - x)$, lo que nos dará un número comprendido entre 0 e infinito (*véase el recuadro* «La elección del sobre»).

• Si el sobre abierto contiene más de y euros, nos quedaremos con él; en caso contrario, tomaremos el otro.

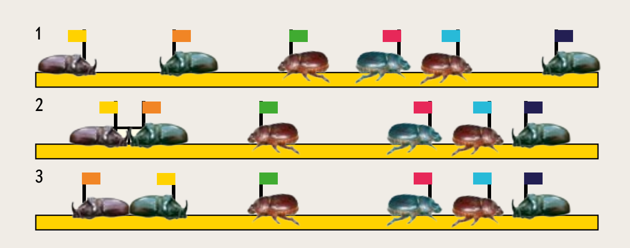
Para demostrar que este método nos conduce a la elección correcta en más del 50 por ciento de las ocasiones, supongamos que los sobres contienen las sumas de dinero a y b respectivamente, con $a < b$, y calculemos la probabilidad de acabar con el sobre correcto (aquel que contiene la suma b). Consideremos dos casos.

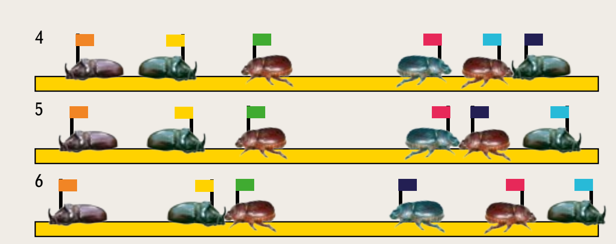
Caso 1: El número y se encuentra comprendido entre a y b. Entonces tomaremos siempre la decisión correcta, ya que si escogemos el sobre ganador no lo cambiaremos, pero sí lo haremos en caso de tomar el sobre incorrecto.

TODOS LOS ESCARABAJOS CAERÁN

Supongamos que colocamos varios escarabajos sobre una regla de un metro de largo, distribuidos y orientados al azar. Los animales avanzan a una velocidad de un centímetro por segundo. Cuando dos de ellos se encuentran, ambos dan media vuelta y prosiguen en sentido contrario. Si llegan al final de la regla, caen. Es posible demostrar sin ninguna dificultad que, con independencia del número de escarabajos, todos ellos habrán caído al suelo en 100 segundos o menos.

Para ver por qué, imaginemos que cada escarabajo porta una bandera de un color y que, cuando dos de ellos se encuentran, las intercambian. De esta manera, cada bandera avanzará siempre en el mismo sentido, por lo que acabará cayendo al suelo en 100 segundos o menos. Dado que esto es válido para todas las banderas, pasado ese tiempo ya no quedará ningún escarabajo sobre la regla. Este problema aparece citado por Peter Winkler en su maravilloso libro *Mathematical mind-benders*.





EL TEOREMA UNIVERSAL DE LAS CUERDAS

Dada una curva, llamamos «cuerda» a un segmento que conecta dos de sus puntos. Entre $x = 0$ y $x = 1$, la función continua $f(x) = \text{sen}(\pi x)$ posee cuerdas horizontales de todas las longitudes L comprendidas entre 0 y 1. En la gráfica de la derecha podemos ver dibujada la cuerda de longitud 0,6. No ocurre lo mismo con la función $f(x) = \text{sen}(2\pi x)$: su representación gráfica muestra claramente que en ella no existen cuerdas horizontales de longitud mayor que 1/2 y menor que 1.

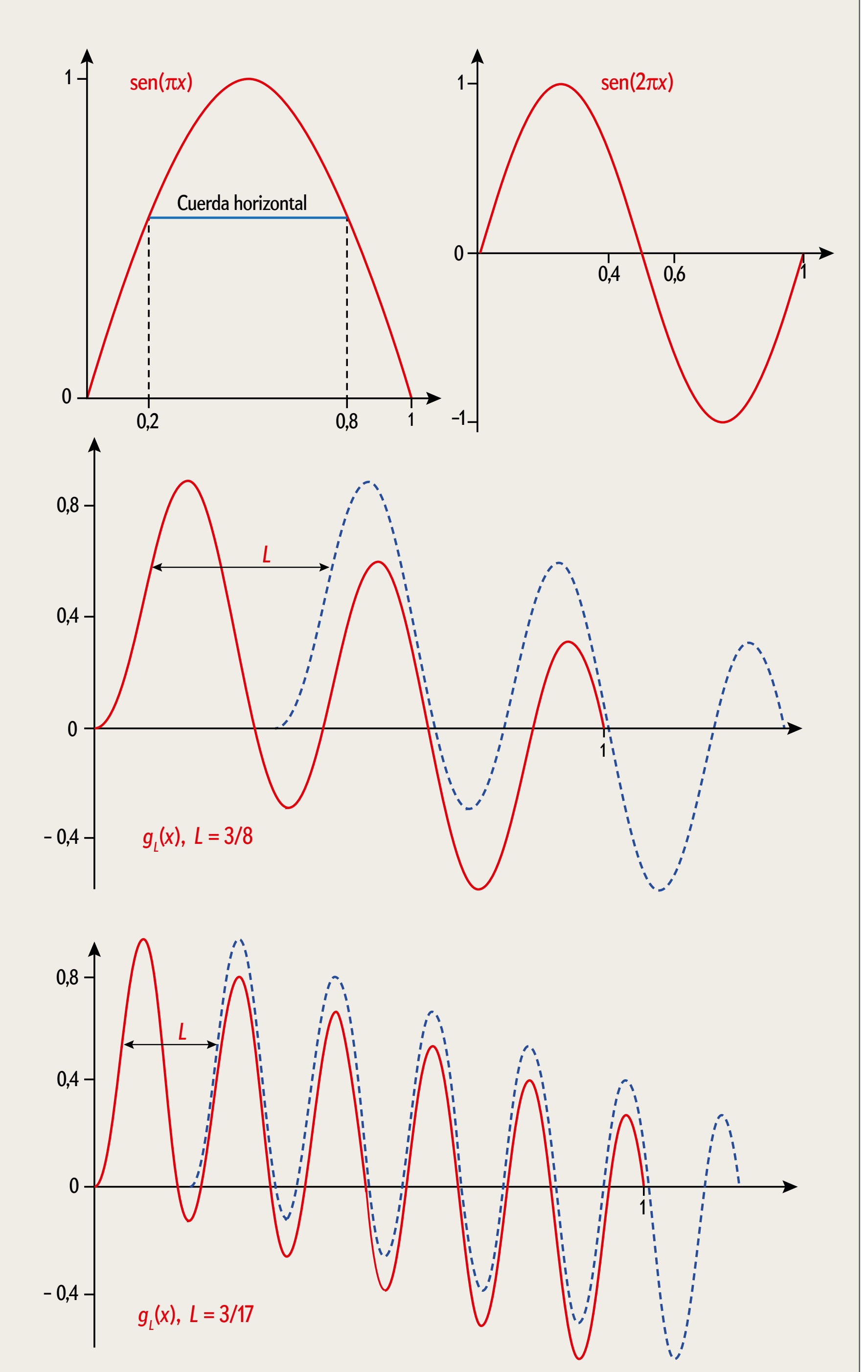
El teorema universal de las cuerdas establece que, para toda función continua $f(x)$ definida en el intervalo [0, 1] y tal que $f(0) = f(1)$, existe una cuerda horizontal de longitud $L = 1/n$, donde n denota cualquier entero positivo. Por otra parte, para todo número real L que no sea el inverso de un entero positivo, existen funciones continuas definidas en [0, 1] y tales que $f(0) = f(1)$ cuya gráfica no posee ninguna cuerda horizontal de longitud L. Dicho de otro modo: para este tipo de funciones, las longitudes de cuerda inevitables, y las únicas inevitables, son aquellas que corresponden al inverso de un entero positivo.

La demostración de la parte afirmativa aparece en el texto principal. La parte negativa requiere considerar la siguiente función, definida en 1934 por el matemático francés Paul Lévy:

$$g_L(x) = \text{sen}^2(\pi x/L) - x\,\text{sen}^2(\pi/L) \;,$$

la cual carece de cuerdas de longitud L a menos que L sea el inverso de un entero.

Sin entrar en los detalles sobre las propiedades de $g_L(x)$, podemos observar el resultado en las dos gráficas que reproducimos aquí para $L = 3/8$ y $L = 3/17$. En cada caso, la curva roja muestra la función $g_L(x)$, mientras que la línea azul punteada representa la misma función desplazada una distancia L hacia la derecha. El hecho de que una y otra nunca se corten significa que no existen cuerdas horizontales de longitud L.



¿Con qué probabilidad ocurrirá esto? Despejando x de la expresión para y obtenemos que $x = y/(1 + y)$. Por tanto, el número y estará comprendido entre a y b si y solo si x se encuentra entre $a/(1 + a)$ y $b/(1 + b)$. Como x ha sido elegido con una probabilidad uniforme en el intervalo entre 0 y 1, la probabilidad c de que x se halle entre $a/(1 + a)$ y $b/(1 + b)$ corresponderá a la longitud del intervalo $[a/(1 + a), b/(1 + b)]$. O, dicho de otro modo:

$$c = b/(1 + b) - a/(1 + a) \;.$$

Caso 2: El número y no está comprendido entre a y b. La probabilidad de hacer la elección correcta será entonces igual a 1/2. En efecto:

- Si a y b son ambos menores que y, entonces habremos escogido al azar un sobre que luego cambiaremos. Ello equivale a elegir uno de los dos sobres al azar, por lo que la probabilidad de ganar será igual a 1/2.

• Si a y b son ambos mayores que y, entonces habremos escogido al azar un sobre que no cambiaremos. Al igual que antes, la probabilidad de haber optado por el sobre correcto será igual a 1/2.

La probabilidad de elegir con acierto cuando y no está comprendido entre a y b es, por tanto, 1/2. Como la probabilidad de que y no se encuentre en el intervalo $[a, b]$ es igual a $1 - c$, combinando los dos casos vemos que la probabilidad P de tomar la decisión correcta viene dada por:

$$P = c + (1 - c)/2 = 1/2 + c/2 = 1/2 + [b/(1 + b) - a/(1 + a)]/2 \ ,$$

que es estrictamente mayor que 1/2.

Para $a = 10$ y $b = 100$, un sencillo cálculo nos muestra que la probabilidad de elegir el sobre con la mayor suma de dinero asciende al 54,05 por ciento.

Este perturbador milagro parece haber sido descubierto varias veces de distintas formas. Dos demostraciones son las debidas al estadístico estadounidense David Blackwell y al también estadounidense Thomas Cover, teórico de la información y experto en teoría de la probabilidad.

Milagro 6: ¿Se caerán los escarabajos?

Veinte escarabajos se encuentran sobre una regla horizontal de un metro de largo. Los insectos están distribuidos de manera aleatoria a lo largo de la regla, cada uno mirando hacia la derecha o hacia la izquierda también al azar. Cada animal avanza a la velocidad de un centímetro por segundo. Cuando dos de ellos se encuentran, ambos dan media vuelta. El giro es instantáneo y el tamaño de los escarabajos es despreciable. Si uno de ellos alcanza un extremo, cae al suelo.

Sin necesidad de precisar más datos, y he aquí el milagro, podemos asegurar que todos los escarabajos acabarán por tierra en menos de una hora. Este resultado sigue siendo cierto si en lugar de 20 escarabajos hay 30 o 100. ¿Por qué? La respuesta, en el recuadro «Todos los escarabajos caerán».

Milagro 7: El teorema universal de las cuerdas

Algunos resultados matemáticos resultan desconcertantes hasta el punto de parecer casi absurdos. Este es el caso del «teorema universal de las cuerdas», del que confieso que, incluso después de ver su demostración, no alcanzo a entender por completo su razón de ser. Lo presentaremos en forma de enigma.

Consideremos una función continua $f(x)$ definida en el intervalo [0, 1] y tal que $f(0) = f(1)$. Por ejemplo, $f(x) = x(1 - x)$. Llamaremos «cuerda horizontal de f de longitud L» a cualquier segmento horizontal con dicha longitud que conecte dos puntos de la gráfica de f. Las abscisas de tales puntos serán x y $x + L$, y tendremos que $f(x) = f(x + L)$.

Dependiendo de la función que hayamos escogido, ciertas longitudes de cuerdas horizontales serán posibles y otras no. Así, para $f(x) = x(1 - x)$ o $f(x) = \mathrm{sen}(\pi x)$, todas las longitudes L comprendidas entre 0 y 1 son posibles. (Por supuesto, para todas las funciones f que estamos considerando sabemos que existe al menos una cuerda de longitud 1, ya que, por hipótesis, $f(0) = f(1)$). Sin embargo, para la función $f(x) = \mathrm{sen}(2\pi x)$ no existen cuerdas horizontales de longitud mayor que 1/2 y menor que 1 (*véase el recuadro* «El teorema universal de las cuerdas»).

Sin embargo, si $f(0) = f(1)$, siempre será posible encontrar cuerdas de longitud L distinta de 1. ¿Cuáles?

Respuesta: El resultado es sorprendente. Para cualquier entero positivo n, y con independencia de cuál sea la función $f(x)$, siempre existirá una cuerda horizontal de longitud $L = 1/n$. Además, para los números L que no sean el inverso de un número entero, siempre habrá funciones $f(x)$ tales que $f(0) = f(1)$ que no posean cuerdas de longitud L.

La parte positiva del teorema fue demostrada en 1806 por el físico André-Marie Ampère. Para la parte negativa hubo que esperar al matemático francés Paul Lévy, quien la probó en 1934.

Vayamos con la parte positiva. Para cualquier $n > 1$, consideremos la función:

$$g(x) = f(x + 1/n) - f(x) \ ,$$

la cual está definida para todo x entre 0 y $1 - 1/n$. Tenemos entonces que:

$$g(0) + g(1/n) + g(2/n) + \cdots + g(1 - 1/n) = f(1) - f(0) = 0 \ ,$$

de lo que se deduce que la función g no puede ser estrictamente positiva en todo su dominio ni tampoco estrictamente negativa. Por el teorema del valor intermedio (según el cual una función continua que valga y_1 en un punto e y_2 en otro ha de tomar todos los valores comprendidos entre y_1 e y_2), sabemos que hay al menos un punto x_0 en el que $g(x_0) = 0$; es decir, hay un punto x_0 en el que:

$$f(x_0) = f(x_0 + 1/n) \ ,$$

lo que demuestra la existencia de una cuerda horizontal de longitud $L = 1/n$.

La función de Paul Lévy, que nos indica cuáles son las únicas longitudes de cuerda posibles, viene dada por:

$$g_L(x) = \mathrm{sen}^2(\pi x/L) - x\,\mathrm{sen}^2(\pi/L) \ .$$

Esta función carece de cuerdas horizontales a menos que L sea el inverso de un número entero. La demostración no es sencilla, pero si con ayuda de un ordenador representamos $g_L(x) - g_L(x + L)$ para distintos valores de L, podremos comprobar que esta función solo se anula en aquellos casos en los que L es el inverso de un entero.

Una presentación de este teorema poco conocido puede encontrarse en el libro *A primer of real functions*, de Ralf Boas.

Milagro 8: El período 3 implica el caos

Finalicemos, esta vez sin demostración debido a su dificultad, con un increíble resultado sobre los ciclos en funciones continuas.

Sea $f(x)$ una función continua que va de [0, 1] a [0, 1]. Para todo x entre 0 y 1, consideremos la siguiente sucesión:

$$x, f(x), f(f(x)), f(f(f(x))), \ldots, f(f(\ldots(x)\ldots)) \ .$$

Si la sucesión retorna en algún momento al número x inicial, diremos que tenemos un ciclo. El menor número entero de pasos para el que esto suceda recibe el nombre de «orden» del ciclo. Por ejemplo, la función $f(x) = 1 - x$ es tal que

$$\begin{array}{lllllll} 3 & \to 5 & \to 7 & \to 9 & \to 11 & \to \cdots & \to (2n+1)\cdot 2^0 \to \cdots \\ \to 3\cdot 2 & \to 5\cdot 2 & \to 7\cdot 2 & \to 9\cdot 2 & \to 11\cdot 2 & \to \cdots & \to (2n+1)\cdot 2^1 \to \cdots \\ \to 3\cdot 2^2 & \to 5\cdot 2^2 & \to 7\cdot 2^2 & \to 9\cdot 2^2 & \to 11\cdot 2^2 & \to \cdots & \to (2n+1)\cdot 2^2 \to \cdots \\ \to 3\cdot 2^3 & \to 5\cdot 2^3 & \to 7\cdot 2^3 & \to 9\cdot 2^3 & \to 11\cdot 2^3 & \to \cdots & \to (2n+1)\cdot 2^3 \to \cdots \\ & \vdots & & & & & \\ \to \cdots & \to 2^n & \to \cdots & \to 2^4 & \to 2^3 & \to 2^2 & \to 2 \to 1 \end{array}$$

SUCESIÓN DE IMPLICACIONES entre los órdenes de los ciclos considerados por el teorema de Sharkovskii para funciones que van de [0, 1] a [0, 1].

todo $x \neq 1/2$ genera un ciclo de orden 2: partiendo de $x = 1/3$, por ejemplo, tenemos el ciclo $1/3 \to 2/3 \to 1/3$.

Existe una propiedad asombrosa descubierta en varias ocasiones, en particular por Tien-Yien Li y James Yorke: si $f(x)$ tiene un ciclo de orden 3, entonces tiene ciclos de todo orden. Pero lo contrario es falso: para todo $k \neq 3$ hay funciones que tienen un ciclo de orden k y que no poseen ciclo de orden 3.

El teorema fue formulado con mayor precisión en 1964 por el matemático ucraniano Oleksandr Sharkovskii, quien descubrió una relación muy sutil y completamente inesperada entre los órdenes de los ciclos. El orden 3 implica el orden 5, el cual implica el orden 7, el cual implica el 9... Al mismo tiempo, el orden 6 implica en 10, que implica el 14, etcétera. Esta relación de implicaciones sucesivas se muestra en la tabla de la página anterior, la cual debe leerse línea a línea y de arriba abajo. La tabla no puede simplificarse, ya que, por ejemplo, existen funciones con ciclos de orden 10 (y por tanto 14, 18...), pero sin ciclos de orden 6, 3, 5, 7...

¿Quién habría imaginado que el mero hecho de ser una función continua que va de un intervalo a sí mismo ocultaría esta misteriosa tabla?

PARA SABER MÁS

Another solitaire game. Dattatreya Kaprekar en *Scripta Mathematica*, vol. 15, págs. 244-245, 1949.

Period three implies chaos. Tien-Yien Li y James Yorke en *The American Mathematical Monthly*, vol. 82, n.º 10, págs. 985-992, diciembre de 1975.

A graph-theoretic proof of Sharkovsky's theorem on the periodic points of continuous functions. Wu Chung-Ho y Charles Morris en *Pacific Journal of Mathematics*, vol. 96, n.º 2, págs. 361-370, diciembre de 1981.

A primer of real functions. Ralf Boas. *The Mathematical Association of America*, 4.ª edición, 1996.

Problem corner. Elwyn Berlekamp y Joe Buhler en *Emissary*, pág. 15, otoño de 1999.

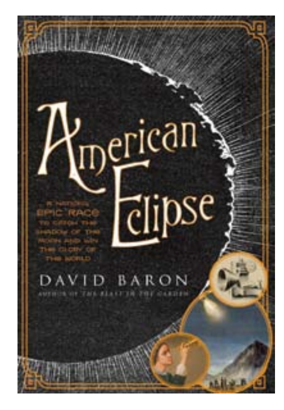
Mysterious number 6174. Yutaka Nishiyama en **plus.maths.org/content/mysterious-number-6174**, marzo de 2006.

Mathematical mind-benders. Peter Winkler. A. K. Peters, 2007.

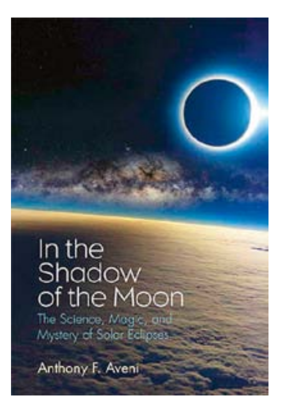
Surprises. Felix Lazebnik en *Mathematics Magazine*, vol. 87, n.º 3, págs. 212-221, junio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

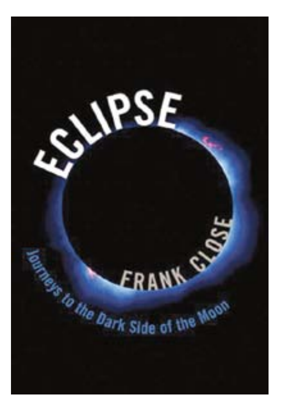
El problema de la detención óptima. Theodore P. Hill en *IyC*, febrero de 2011.



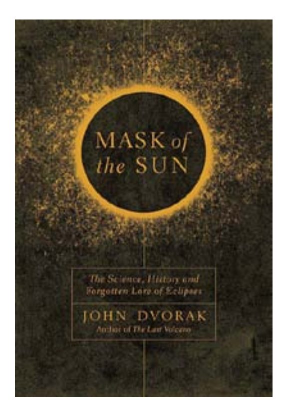
AMERICAN ECLIPSE
A NATION'S EPIC RACE TO CATCH THE SHADOW OF THE MOON AND WIN THE GLORY OF THE WORLD
David Baron.
Liveright, 2017.



IN THE SHADOW OF THE MOON
THE SCIENCE, MAGIC, AND MYSTERY OF SOLAR ECLIPSES
Anthony Aveni.
Yale University Press, 2017.



ECLIPSE
JOURNEYS TO THE DARK SIDE OF THE MOON
Frank Close.
Oxford University Press, 2017.



MASK OF THE SUN
THE SCIENCE, HISTORY, AND FORGOTTEN LORE OF ECLIPSES
John Dvorak.
Pegasus, 2017.

Un eclipse americano

Cuatro libros como preludio al próximo eclipse solar del 21 de agosto, que será total en Estados Unidos y parcial en varios países latinoamericanos

El 21 de agosto de 2017, Estados Unidos vivirá su primer eclipse total de Sol cien por cien estadounidense. Por primera vez, la trayectoria de la sombra de totalidad (una franja de unos cien kilómetros de ancho) tocará tierra solo en ese país, pasando sobre los hogares de 12 millones de personas en 14 estados, desde Oregón a las Carolinas. Heliofísicos y umbráfilos de todo el mundo se preparan para ese momento, al igual que los funcionarios del Departamento de Transporte de EE.UU. Los primeros todavía reflexionan sobre los resultados del eclipse de 1999, cuya trayectoria atravesó Europa desde Cornualles hasta Rumanía y más allá, así como sobre los eclipses totales que han ocurrido desde entonces. Los últimos están haciendo todo lo posible para asegurarse de que millones de conductores lleguen a la franja y salgan de ella de manera segura.

El alboroto es comprensible. Un eclipse total de Sol constituye uno de los espectáculos más extraordinarios que puede ofrecernos la naturaleza: el cielo que se oscurece de repente, las «perlas de Baily» (destellos de luz solar que brillan a través de los valles lunares), el deslumbrante efecto del «anillo de diamantes», la corona solar, nacarada y llena de puntas. Luego, un par de minutos más tarde, la misma función pero a la inversa. Igual de fascinante es saber que estamos presenciando una sizigia: el alineamiento de la Tierra, la Luna y el Sol que hace que el cielo se oscurezca en un factor 10.000 tan solo en el último minuto. Los cuatro libros que reseñamos aquí se adelantan, desde diferentes puntos de vista, a este espectacular acontecimiento celeste [*véase* «El gran eclipse solar de 2017», por Jay M. Pasachoff, *y* «Mil años de eclipses solares», por Mark Fischetti, *en este mismo número*].

En ***American eclipse***, el periodista David Baron rememora el eclipse total que pudo verse en Estados Unidos en julio de 1878 (leí una versión preliminar de este libro y escribí un breve comentario sobre él). Un grupo de eminentes científicos, entre ellos el astrónomo Henry Draper y su esposa, Anna, viajaron a Rawlins, Wyoming, para presenciarlo. Pero, como relata Baron, fue un joven prodigio de 31 años, el inventor Thomas Edison, quien se ganaría la mayor parte de la fama a pesar de que solo los acompañaba. Edison llevó al viaje uno de sus ingenios, un tasímetro (un instrumento capaz de detectar ligerísimos cambios de temperatura), para medir el calor de la corona solar durante el eclipse. Sin embargo, no estaba preparado para la intensidad de la señal y la aguja del aparato se quedó clavada en la lectura máxima. No fue hasta alrededor de 1940 cuando los físicos Walter Grotrian, Bengt Edlén y Hannes Alfvén descubrieron que la corona solar presenta una temperatura de al menos un millón de grados Celsius. Si el tasímetro de Edison hubiera funcionado, el inventor habría obtenido el engañoso valor de 6000 grados centígrados (la temperatura superficial del Sol), debido a la luz solar dispersada que vemos como la corona interior.

Baron ha seleccionado buenas historias y las ha contado bien. La astrónoma pionera estadounidense Maria Mitchell (la primera persona contratada como profesor por el Colegio Universitario Vassar de Poughkeepsie, en Nueva York) se llevó al eclipse a un grupo de alumnas, aunque a estas no se les ofreció viajar gratis en tren, como sí se hizo con sus homólogos masculinos. El astrónomo e inventor Samuel Pierpont Langley, el meteorólogo Cleveland Abbe y el astrónomo y espectroscopista solar Charles Young también fueron testigos del eclipse. Nueve años antes, Young había descubierto en el espectro de la corona la línea verde que resultaría clave para deducir la tem-

peratura coronal. En los años cuarenta, se descubrió que esta línea proviene de un gas de hierro tan caliente que buena parte de sus átomos han perdido la mitad de los electrones.

La historia de los eclipses es larga y global. ***In the shadow of the Moon***, del astrónomo e historiador de la ciencia Anthony Aveni, escarba en las observaciones de cinco milenios. La obra nos ilustra acerca de los eclipses en la antigua Babilonia, como los registrados en un fragmento de tablilla del año 280 antes de nuestra era. Aveni analiza la historia según la cual el filósofo griego Tales de Mileto predijo el eclipse del 28 de mayo del año 585 a.C., que supuestamente detuvo una batalla entre los medos y lidios. Al respecto, el autor se muestra escéptico sobre la supuesta conexión entre esas fechas antiguas y los auténticos eclipses.

Aveni también se ocupa de los eclipses totales vistos en Estados Unidos, como el que ocurrió en la ciudad de Nueva York en 1925. La gente se sentó sobre los tejados a lo largo del río Hudson para marcar el borde inferior de la sombra en la calle 96, y el efecto del anillo de diamantes fue mencionado por primera vez en los medios del país. Aveni concluye que ni el arcoíris, ni los cometas, ni los meteoros ni la aurora boreal superan «la efímera y exquisita belleza» de un eclipse total de Sol.

En ***Eclipse***, el físico de partículas Frank Close se decide por historias más personales. En 1954, cuando tenía ocho años, Close presenció un eclipse parcial de Sol que le inspiraría para convertirse en científico. Más tarde, en 1999, las nubes frustraron casi por completo su intento de ver la totalidad desde Cornualles. Sin embargo, logró presenciar eventos posteriores desde Zambia, Libia, Tahití y, en 2013, desde un barco en la costa oeste de África. En palabras del autor: «Como druidas reunidos en Stonehenge para dar la bienvenida a los equinoccios, me había unido a un culto internacional cuyos miembros adoran la muerte y el renacimiento del Sol en mecas variables, una media docena de veces por década». Aunque el autor introduce aquí y allá una pizca de historia y de ciencia, nos ofrece ante todo un libro de viajes.

Al igual que Close, el astrónomo John Dvorak va saltando de eclipse en eclipse en ***Mask of the Sun***, si bien aquí el foco se sitúa en la historia de la ciencia más que en las anécdotas. Las citas que intercala revelan la extraordinaria atracción que estos eventos han ejercido sobre la imaginación humana. La escritora Virginia Woolf, por ejemplo, que había presenciado el eclipse total de 1927 en el norte de Inglaterra, escribió sobre él en su ensayo *El sol y el pez* al año siguiente: «Muéstrame el eclipse, le decimos al ojo; volvamos a ver ese extraño espectáculo».

El libro proporciona una crónica rica en detalles. Dvorak relata cómo, en 1684, Increase Mather, presidente del Harvard College, retrasó la ceremonia de graduación diez días para que profesores y estudiantes pudieran llegar a Martha's Vineyard, una isla cercana a la costa sur del estado de Massachusetts, para ver un eclipse total. (Mather, un pastor puritano, no tuvo una actitud tan progresista sobre los juicios por brujería de Salem que tuvieron lugar menos de diez años después, los cuales se negó a condenar.) También leemos cómo el astrónomo Edmond Halley predijo el eclipse que atravesó Inglaterra en 1715 y cómo recopiló observaciones públicas para mejorar la predicción del evento de 1724, que cruzó el país hasta llegar a la Europa continental. Y también se nos recuerda el papel que desempeñó un eclipse en la consagración de Albert Einstein: al elaborar su teoría general de la relatividad, en 1916, el físico alemán había predicho que durante un eclipse podría observarse un cambio en la posición aparente de algunas estrellas cercanas al Sol; tres años después, el astrónomo inglés Arthur Eddington midió el efecto con gran éxito.

Junto con otros trabajos recientes, como el estupendo *Sun Moon Earth* (Basic Books, 2016), del astrónomo Tyler Nordgren, y el excelente y exhaustivo *Totality* (Oxford University Press, 2017), de Mark Littmann y Fred Espenak, estos libros enriquecerán a cualquier persona interesada en entender los eclipses. Proporcionan una completa y valiosa bibliografía para aquellos que se estén preparando para el gran evento que tendrá lugar en agosto (en mi caso, será mi trigésima cuarta expedición para presenciar un eclipse total de Sol) y espero que convenzan a muchos otros de verlo en vivo.

—Jay M. Pasachoff
Colegio Universitario Williams
Grupo de Trabajo sobre Eclipses Solares
Unión Astronómica Internacional

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 545, págs. 409-410, 25 de mayo de 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature



LA LÓGICA DE LOS MONSTRUOS
¿HAY ALTERNATIVAS A LA NATURALEZA TAL COMO LA CONOCEMOS?

Ricard Solé.
Tusquets Editores, 2016

Los límites de lo posible

Una reflexión interdisciplinar sobre los caminos de la evolución biológica

Para cualquier persona con sensibilidad y curiosidad por la naturaleza, leer un libro que nos invita a reflexionar sobre algunos de los principales porqués del mundo en que vivimos, como *La lógica de los monstruos*, es siempre una estupenda inversión de tiempo. Y si la obra está bien fundamentada y magníficamente escrita, y además tiene un título tan sugerente —no sé a ustedes, pero a mí los títulos de los libros me atraen casi tanto como su contenido—, el resultado es un verdadero deleite. A lo largo de siete capítulos, el biólogo y físico Ricard Solé, uno de los investigadores y divulgadores más brillantes del panorama científico

actual, reflexiona sobre preguntas como ¿existen alternativas a la vida y la naturaleza tal como la conocemos?, ¿tienen límites las formas que los organismos pueden adoptar? o ¿por qué nuestro universo tiene tres dimensiones espaciales y una temporal?

Tales preguntas no son novedosas en sí mismas, ya que por su carácter fundamental han interesado a pensadores y científicos desde el principio de los tiempos. Sin embargo, lo novedoso de *La lógica de los monstruos* es la manera en que el autor intenta responderlas. Para ello, Solé nos sumerge en un sugestivo viaje que va desde las bases químicas y moleculares de la vida hasta la teoría de cuerdas para explicar los fundamentos de nuestro universo. Apoyándose en algunos de los resultados más sólidos de la biología, la física y las matemáticas, y asumiendo que la evolución por selección natural no solo actúa sobre lo vivo, sino también sobre procesos como el lenguaje y otras expresiones culturales, Solé nos invita a repensar la naturaleza que nos rodea, explora nuestra capacidad para imaginar criaturas fantásticas y aprovecha la fascinación que siempre hemos sentido por «lo monstruoso». Como se nos dice al comienzo del libro: «Los monstruos, en definitiva, nos han acompañado a lo largo de nuestra historia evolutiva y constituyen una parte esencial del legado cultural de todas las civilizaciones» [*véase* «La evolución de los mitos» por Julien d'Huy; Investigación y Ciencia, febrero de 2017].

A lo largo de la obra, el autor va desgranando algunos de los últimos avances científicos en disciplinas tan variadas como la cosmología, la antropología, la neurología, la lingüística, la física teórica y la inteligencia artificial. El libro analiza lo que la ciencia tiene que decir sobre lo posible y lo imposible, como bien nos recuerdan los indicios científicos que apuntan a que no puede haber una variedad infinita de formas, o «monstruosidades», debido a las restricciones estructurales de los organismos vivos y a las limitaciones de los mecanismos que producen su complejidad, como apuntaba el biólogo Pere Alberch (1954-1998) en un artículo cuyo título inspiró al de este libro.

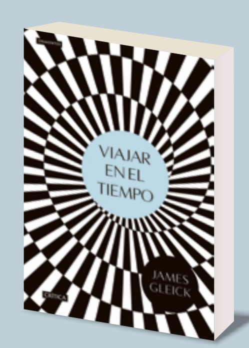
Debido a la gran cantidad de temas tratados y a la complejidad de algunos de ellos, la tarea que se ha planteado Solé no resulta sencilla en absoluto. Es por ello por lo que emplea, con gran acierto, numerosos ejemplos que ilustran y facilitan notablemente la comprensión de conceptos, a priori, muy complicados de entender por un público no especialista, como la teoría de cuerdas o el famoso experimento mental del gato de Schrödinger.

La obra llega a la conclusión de que es altamente improbable que haya alternativas a la vida tal como la conocemos hoy, y que los límites de lo posible encuentran su acomodo dentro del conocimiento científico. No obstante, dado que no tenemos respuestas a todas las preguntas planteadas en el libro, el propio autor abre una puerta a la posibilidad de que «existan formas alternativas de pensamiento que quedan fuera de nuestro alcance cuando hemos educado nuestra mente en cierto conjunto de reglas. De ser así, existirían espacios en blanco en el mapa de lo posible, a los que nadie ha accedido jamás y en los que nos aguardan formas distintas de pensar, inventar e incluso de definir teorías». No está todo dicho, pues, en lo que concierne a la comprensión de nuestro mundo, y sin duda la lectura de este libro nos resolverá muchas dudas pero nos generará también muchas otras, algo muy de agradecer en una obra de estas características.

NOVEDADES



TODO ESTÁ EN LOS NÚMEROS
Claudi Alsina
Ariel, 2017
ISBN: 978-84-344-2563-7
224 págs. (17.90 €)



VIAJAR EN EL TIEMPO
James Gleick
Crítica, 2017
ISBN: 978-84-16771-77-6
352 págs. (22,90 €)

BREVE HISTORIA DE TODOS LOS QUE HAN VIVIDO
EL RELATO DE NUESTROS GENES
Adam Rutherford
Pasado & Presente, 2017
ISBN: 9788494619359
348 págs. (29 €)



YO SOY YO Y MIS PARÁSITOS
CÓMO CRIATURAS MINÚSCULAS MANIPULAN NUESTRO COMPORTAMIENTO Y TRANSFORMAN SOCIEDADES
Kathleen McAuliffe
Ediciones Urano, 2017
ISBN: 978-84-15732-25-9
312 págs. (21 €)

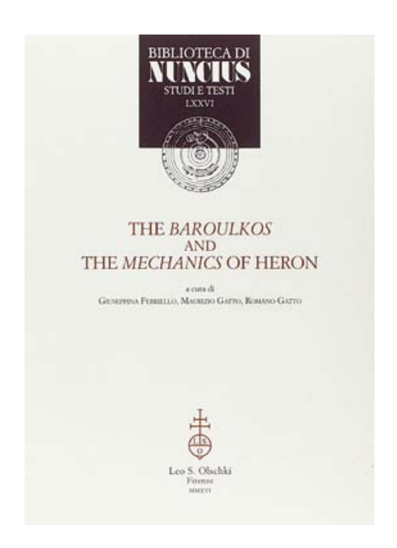


Comencé a leer *La lógica de los monstruos* con gran expectación dado lo atractivo y ambicioso de la empresa planteada por Solé, amén de mi interés y admiración por su obra. Aun así, el libro superó todas mis expectativas. Más allá de lo fascinante de la temática y de cómo el autor desgrana los distintos temas tratados, me ha sorprendido muy gratamente lo bien escrito que está. Su prosa, rigurosa y amena a la vez, consigue que el libro se lea como las novelas más adictivas. De hecho, sus páginas me trajeron a la memoria pasajes de *La sombra del viento*, de Carlos Ruiz Zafón. *La lógica de los monstruos* también me ha servido para conocer y acercarme a la obra de Alberch, que desconocía, así como para recordar la de otro insigne científico, Joan Oró (1923-2004), cuyos trabajos no leía desde mi época de estudiante de biología.

Como posible defecto, únicamente apuntaría que no todos los capítulos están igual de bien hilvanados, algo por otra parte comprensible dado lo variopinto de los temas tratados y su complejidad. También se echa a faltar un capítulo final a modo de síntesis o recapitulación, que creo que vendría muy bien a los alumnos de grado o máster y a aquellos lectores que no puedan acabar el libro en pocos días.

En resumen, nos encontramos con una gran obra de divulgación científica a la altura de lo que cabe esperar de un científico y pensador del calibre de Ricard Solé. *La lógica de los monstruos* es un libro altamente recomendable para todo aquel que sienta curiosidad por comprender mejor nuestro mundo, así como una lectura obligada para cualquier alumno universitario cuyo grado tenga algo que ver con las ciencias de la naturaleza. Al respecto, yo ya lo he incorporado a la bibliografía de la asignatura que imparto a mis alumnos de primer curso en la Universidad Rey Juan Carlos, y animaría a todos mis colegas profesores a que hicieran lo mismo.

—Fernando T. Maestre Gil
Unidad de Biodiversidad y Conservación
Universidad Rey Juan Carlos
Madrid



THE *BAROULKOS* AND THE *MECHANICS* OF HERON
Dirigido por Giuseppina Ferriello, Maurizio Gatto y Romano Gatto
Leo S. Olschki, 2016

Herón de Alejandría

Teoría aplicada a la ingeniería mecánica

Herón de Alejandría floreció a mediados del siglo I de nuestra era, aunque no sabemos nada sobre su vida aparte de los escritos que se le atribuyen. Se subraya, como un gran adelanto propio, la invención de una máquina que lleva su nombre: una suerte de turbina primitiva de reacción en la que una corriente emitida por dos bocas en dirección opuesta provocaba una rotación. La investigación reciente muestra que conoció toda la matemática de su tiempo. Sus libros *Neumática* y *Mecánica* revelan un ejercicio constante de la enseñanza de física. Estas y otras obras repasan el estado de la mecanización en sus días: bombas, sifones, máquina de acuñar moneda e instrumentos de inspección. Escribió también sobre autómatas, óptica y propagación de la luz.

Los tres libros de la *Mecánica* contienen la primera teoría sistemática de las máquinas simples y compuestas en la historia de la ciencia, así como otras muchas materias notables sobre mecánica teórica y práctica, incluidas tres teorías interesantes y desconocidas de Arquímedes. Este tratado comenzó a circular entre investigadores occidentales a través de un manuscrito árabe descubierto por Camille Carra de Vaux, quien lo publicó junto con su traducción francesa en 1893, *Les mécaniques ou l'élévateur de Héron d'Alexandrie*. Este orientalista fue el primero en dar un fuerte impulso a los estudios sobre Herón. Partía del manuscrito árabe de Qusta ibn Luqa al-Baalbakki, la versión más completa de la *Mecánica* de Herón. La pieza fue compilada en torno a 1445 e introducida en Europa por Jacob Gohl (Golius), profesor de matemáticas y árabe en Leiden. Golius había traducido el manuscrito al latín; la traducción del primer capítulo concerniente al *Baroulkos* se había publicado póstumamente por Anton Brugmans en Gotinga en 1785.

Tras el trabajo de Carra apareció una edición crítica en lengua alemana, preparada por Ludwig Leo Nix (1900). Sus fuentes fueron el manuscrito de Leiden, otro de Constantinopla, otro del Museo Británico de Londres y un cuarto de El Cairo. Hasta el presente la edición de Nix era la única edición crítica completa. Más de medio siglo más tarde, en 1963, Aage Gerhardt Drachmann publicó *The mechanical technology of Greek and Roman Antiquity*, con capítulos resultantes de la colación entre las ediciones de Carra y Nix. Por último, en 1999, Jutta Miller publicó en línea la traducción inglesa de la versión alemana de Nix.

Así estaban las cosas hasta que llegó la obra que glosamos y recomendamos al lector, dividida en dos partes, una dedicada al texto y la otra a analizar el contenido científico y técnico de la *Mecánica*. El hallazgo fortuito de un manuscrito persa en la Biblioteca Nacional de Francia, con la recuperación posterior de otros tres manuscritos persas relativos a una versión reducida del libro segundo de la *Mecánica*, ha aumentado el interés y apertura de una nueva línea de investigación: la difusión del texto de Herón en el mundo islámico. La nueva edición crítica presentada en el libro de cabecera, con todas sus fuentes, obedece al descubrimiento inesperado de cuatro manuscritos persas, referidos todos al segundo libro del tratado sobre mecánica del alejandrino, el cual abrió un cam-

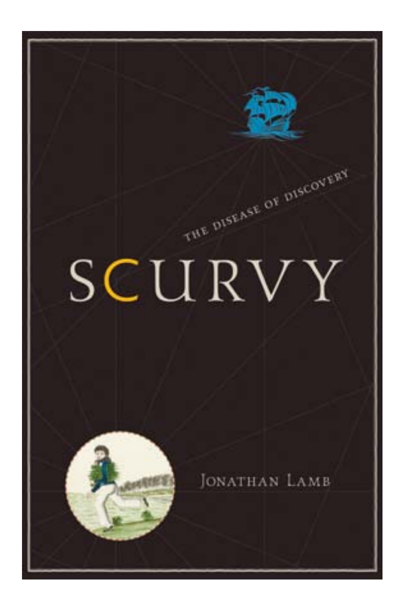
po inexplorado para la investigación y ofrecía nuevas perspectivas filológicas y técnico-científicas. Al propio tiempo, el análisis de la obra ha revelado pasajes muy parecidos en los escritos de Leonardo da Vinci y Galileo Galilei, avanzando la posibilidad de que los científicos italianos del renacimiento pudieran haber estado familiarizados, en parte o en todo, con la *Mecánica* de Herón.

Los temas introducidos en el libro primero han contribuido a crear un tratado científico de mecánica fundado sobre sólidas bases teóricas. El término *Baroulkos* deriva de *barós*, que significa «peso», y *elkein*, «tirar hacia uno, sacar». Era una herramienta constituida por una caja rectangular estable, con ejes paralelos entre sí y paralelos a los lados más cortos, para hacerlos girar en huecos operados en los lados más largos. Para mover un peso del equivalente a unos mil talentos con una potencia de cinco, se usan tres ruedas con ejes. Los diámetros de las dos ruedas primeras son cinco veces mayores que los de los ejes, mientras que el de la tercera es ocho veces mayor que el tercer eje. No parece que la construyera, sino que se limitó a un mero cálculo teórico.

El aspecto más notable por el que es conocida la *Mecánica* de Herón es, en efecto, la estrecha relación entre teoría y práctica. La exposición de la teoría de las cinco máquinas simples constituye un ejemplo arquetípico; tras describirlas, detalla su aplicación en máquinas simples. Introduce el principio general de los círculos concéntricos, equivalente a la ley arquimediana del equilibrio de la palanca. El principio sobre el que basa el pantógrafo, por el que pueden agrandarse las figuras, es la duplicación del cubo, sobre el cual Herón presenta su propio método. La teoría arquimedeana de los centros de gravedad de las figuras planas, así como la de la balanza, se explican de una manera teórica, puesto que se trataba de teorías matemáticas puras. (Herón recupera tres obras perdidas de Arquímedes: un tratado sobre los centros de gravedad de las figuras planas, otro del *Libro de los apoyos* sobre el peso de una viga soportada de formas distintas sobre determinado número de pilares, y un último sobre la balanza y la palanca angular.)

El alejandrino aporta la primera teoría orgánica de las máquinas simples en la historia de la mecánica. Al abordar, en el libro segundo de la *Mecánica*, las herramientas simples y compuestas, ofrece, por vez primera en la historia de la ciencia, varios hitos importantes: la idea de que, para izar un peso, es necesario primero aplicar una fuerza que equilibre la del peso y luego aumentar esa fuerza en una cuantía pequeña; y el principio de compensación, que regula la relación entre la fuerza que mueve un peso y la velocidad del peso movido. Aparece allí su explicación sobre el tren de engranajes. El libro tercero está consagrado a mostrar las cinco fuerzas para construir herramientas capaces de alzar grandes pesos con una fuerza relativamente pequeña. Todas esas cuestiones se completan con un exhaustivo aparato geométrico en esta espléndida edición crítica.

—Luis Alonso



SCURVY
THE DISEASE OF DISCOVERY
Jonathan Lamb
Princeton University Press, 2016

El escorbuto

Historia de una enfermedad devastadora

Enfermedad carencial, clásica entre los marineros, el escorbuto aparece con la falta de ácido ascórbico, o vitamina C. Ni los humanos ni algunos animales pueden sintetizar su propio ácido ascórbico. Al revestir una importancia crucial en los procesos metabólicos, resulta inverosímil que esa capacidad de síntesis se hubiera perdido en el curso de la evolución, si no fuera porque se hizo innecesaria, pues el ácido ascórbico venía suministrado en la dieta común de los humanos a lo largo de cientos de miles de años. Sin embargo, aunque el escorbuto debió presentarse ya en la Antigüedad, no parece frecuente con anterioridad al siglo xv. A partir de entonces, y hasta finales del siglo xviii, se produjo la mayor mortandad por este trastorno.

El afán comercial, las exploraciones y el imperio que acompañaban al creciente poderío económico de Europa impulsaron a adentrarse en mar abierto y a navegar durante períodos de tiempo suficientes para que se desarrollara la enfermedad, auténtico flagelo de las tripulaciones. En esos siglos se cruzaron por vez primera el océano Atlántico, el Índico y el Pacífico, unas travesías que se prolongaban, lejos de tierra, más de tres meses. Los grandes viajes de circunnavegación conquistaron los océanos del mundo y trajeron inmensas riquezas y conocimientos a Europa. Pero costaron un precio muy alto, con males que destruían cuerpo y mente. (El escorbuto triplicó las bajas sufridas en la guerra civil norteamericana.) Privada la tripulación de fruta fresca y de hortalizas, fuentes de vitamina C, a bordo vivía de carne conservada y cereales secos. La asociación entre escorbuto y carencia vitamínica se les escapó a médicos y exploradores.

El escorbuto afectó también a los ejércitos, en particular durante los asedios, a los prisioneros en campos de concentración y a los exploradores del Ártico y el Antártico. Supuso también una tortura para los irlandeses durante la hambruna de 1845-46, por ruina de la cosecha de patatas, las cuales contienen vitamina C. Se requieren unas 30 semanas de privación de vitamina C para que aparezcan los síntomas de la enfermedad y se pro-

duzca la muerte. El escorbuto presenta unos síntomas tan horrorosos que los pacientes mantienen a menudo en secreto sus dolores.

A veces se presenta acompañado de beriberi. Los diarios de navegación hablan de la acumulación de líquidos en las piernas, un signo del beriberi. Coincidía con la pelagra en la inestabilidad mental y los cambios de personalidad. Del propio relato del capitán James Cook se desprende que, en los días anteriores a su muerte, había adquirido un comportamiento caprichoso y fuera de razón. Sir James Watt, cirujano naval, lo atribuía a la pelagra.

Había un terrible recelo ante el escorbuto porque se tenía por una enfermedad inmunda y repugnante. Los afectados despiden un olor fétido, algo que nadie estaba dispuesto a admitir. En las descripciones se evitaba la palabra que evocaba temibles destrozos físicos para no herir la sensibilidad del lector. Se produce una auténtica desintegración del cuerpo, que se manifiesta con una piel cuarteada, ampollas de sangre y ulceraciones extensas que se ennegrecen y se pudren. Se fragmentan los huesos y se reabren las heridas cerradas. El cuerpo deja de fabricar colágeno; el cartílago, en especial el que rodea al tórax, comienza a desaparecer. Arterias y capilares se degradan y se obturan. En cualquier momento pueden aparecer ictus y aneurismas.

Los síntomas no se ciñen al cuerpo. Se resiente la mente con la desintegración del sistema nervioso. La función de la vitamina C es limpiar de radicales libres, materia de desecho de la actividad cerebral, causante de la oxidación. Cuando los neurotransmisores serotonina y dopamina no funcionan adecuadamente, el cerebro comienza a sufrir alucinaciones. Sueños de alimentos que, al despertarse y desaparecer la alucinación, crean desesperación y abatimiento, la famosa nostalgia del escorbuto.

La medicina debe el primer ensayo clínico riguroso sobre el escorbuto a James Lind, cirujano y padre de la higiene naval, quien lo realizó en 1747. Investigó cuanto se sabía sobre el particular y acometió experimentos cuidadosamente controlados en mar y en tierra. Dividió a una docena de enfermos en seis grupos de dos, tratando a cada par con un remedio distinto durante 14 días. Los dos marineros que recibieron dos naranjas y un limón se recuperaron. Su *Tratado sobre el escorbuto*, publicado en 1753, constituye un modelo de lo que debe ser una observación y un ensayo. A mediados del siglo XVIII se mostró reiteradamente que el zumo de cítrico podía prevenir el escorbuto. El célebre descubridor James Cook mantuvo sana a su tripulación durante largas circunnavegaciones con fruta fresca y hortalizas. Joseph Banks, joven naturalista a bordo del *Endeavor,* lo relata. Años más tarde, en 1795, el Almirantazgo tomó cartas en el asunto y el zumo de lima o limón entró a formar parte obligada de la dieta de a bordo.

En las postrimerías del siglo XIX, con la medicina centrada en la etiología microbiológica, el escorbuto pasó a un segundo plano. Pero advino un nuevo tipo de medicina con el descubrimiento de las vitaminas, término acuñado en 1912 por Casimir Funk. Ya en 1885, Kanehiro Takaki, médico de la Armada japonesa, había comprobado que la frecuencia del beriberi en los marinos dependía del predominio del arroz descascarillado en su dieta. Esta observación fue confirmada por el holandés Christiaan Eijkman en 1896, al producir la polineuritis aviar o beriberi experimental. Funk curó en 1912 dicha polineuritis con compuestos nitrogenados que había aislado de la cascarilla del arroz y que llamó «aminas vitales»; de donde procede «vitamina».

En 1914, Joseph Goldberger llegó a la conclusión de que la pelagra no era una enfermedad infecciosa, sino que venía causada por carencias nutricionales. Cuando Funk inició su trabajo, ya era conocida en los estudios clínicos la vinculación entre determinadas patologías y la falta de vitaminas específicas: el beriberi se debía a la carencia de tiamina (vitamina B_1); el escorbuto, a la ausencia de ácido ascórbico (vitamina C), etcétera. En 1930 se demostró que el factor preventivo de la pelagra era el ácido nicotínico, parte del complejo de la vitamina B. A mediados de siglo se había identificado ya la estructura química de numerosas vitaminas, paso previo para su síntesis. En esta tarea destacó Albert Szent-Gyorgy, que aisló la vitamina C (1928) y la B_6 (1934), trabajos que le llevarían a ganar el premio Nobel en 1937.

El escorbuto ha inspirado grandes obras de la literatura. A ello le dedica el autor una extensa parte del libro, lo que le confiere al relato particular viveza y atractivo.

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Agosto 1967

Una agricultura eficiente

«El hecho de que la producción de alimentos y fibra ocupe solo al 5 por ciento de la mano de obra de EE.UU. se debe principalmente a la mecanización de la agricultura. Otros avances técnicos, como los abonos sintéticos, los plaguicidas o la mejora genética, aportan contribuciones esenciales, pero la mecanización sigue siendo el factor más destacado. La recolección y aventado de una cosecha suele suponer al menos la mitad de los costes de producción. Y es con mucho la parte del proceso agrícola de más difícil mecanización. No obstante, en EE.UU. las operaciones mecanizadas de recolección han hecho tales progresos que, pese al alto precio de las máquinas y otros medios técnicos, el coste de los alimentos para las familias estadounidenses respecto a sus ingresos es, en porcentaje, el más bajo del mundo (el 18 por ciento).»

Las cifras del Departamento de Agricultura de EE.UU. para 2015 muestran que el gasto familiar en alimentos sigue siendo el más bajo del mundo.

¿Se expande el lecho oceánico?

«La hipótesis de que el lecho de los océanos se ha estado expandiendo pretende explicar algunas características de las cuencas oceánicas y los continentes suponiendo que los materiales que brotan desde el interior del planeta forman crestas montañosas en alta mar y luego, conforme suben materiales nuevos, se desplazan alejándose de las crestas. Esta hipótesis se ha visto reforzada recientemente por el descubrimiento de bandas de magnetismo normal e inverso paralelas a las crestas oceánicas de alta mar, lo que al parecer revela el afloramiento de roca fundida durante "épocas de polaridad" magnética diferentes.»



Agosto 1917

Protección de las plantas silvestres

«Durante los últimos quince años, unos cuantos amantes de la naturaleza han estado realizando una activa campaña en pro de la conservación de nuestras flores y otras plantas silvestres. Según un análisis de esos trabajos publicado por la señora Elizabeth Britton en *American Museum Journal,* algunas de las plantas que necesitan una protección más urgente ya se hallan cercanas a la extinción en numerosas zonas del país donde antaño abundaban. El movimiento para la conservación se inició en 1901 con una dotación de 3000 dólares para "la investigación y la conservación de nuestras plantas". La Sociedad Americana para la Conservación de las Flores Silvestres está implantada en varias ciudades. Los fondos financian artículos, panfletos, carteles y transparencias para ilustrar conferencias en centros de enseñanza media y superior.»

Los británicos también habían colaborado en la fundación del Jardín Botánico de Nueva York en 1891.

Tracción por cable

«Hoy, una maniobra ágil y una descarga rápida de vagones es un factor de suma importancia en la movilización industrial para la guerra, especialmente en el trasiego de mineral de hierro en los muelles. En la figura se muestra un nuevo tipo de locomotora de empuje pensada para acelerar la descarga de cargueros y vagones y eliminar las locomotoras de maniobra. La máquina está movida por un único cable, el cual se halla tendido entre los raíles a lo largo de todo el muelle. El cable está fuertemente anclado a sendas bases de hormigón en ambos extremos mediante un mecanismo tensor elástico que lo mantiene tirante.»



LOS VAGONES de tracción por cable mejoran el manejo de los materiales industriales, 1917.



Agosto 1867

Enseñanza de la odontología

«Hace cuarenta años, cirujanos y médicos hacían de sacamuelas cuando la ocasión lo requería. En 1820, en EE.UU. no había sino 30 dentistas en ejercicio. En 1850 la cifra había ascendido a 2923, y actualmente hay unos 5000. En esta ciudad se ha fundado un centro para la enseñanza de quienes deseen dedicarse a tal profesión [la actual Escuela de Odontología de la Universidad de Nueva York], y el profesorado de la Universidad Harvard previó un departamento de odontología en la última ceremonia de graduación.»

Una vergüenza para los neoyorquinos

«Los mercados de Nueva York son una vergüenza para la ciudad e indignos de la iniciativa de nuestro pueblo. Sorprende que los sucios, impresentables e indecentes mercados no sean sustituidos por unas estructuras arquitectónicas dignas del espíritu emprendedor estadounidense. Podrían levantarse edificios en el lugar de las destartaladas barracas hoy ennoblecidas con el nombre de mercados, los cuales no solo fueran motivo de orgullo como estructuras arquitectónicas, sino también fuente de beneficios. Pocas mejoras públicas son más necesarias en Nueva York que la de los mercados, que hoy, literalmente, apestan nuestras fosas nasales.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVII, N.º 7, 18 DE AGOSTO DE 1917

NEUROCIENCIA

La intrincada red de la memoria

Alcino J. Silva

Una revolución técnica arroja luz sobre el modo en que el encéfalo conecta los recuerdos, un proceso esencial para entender y organizar el mundo que nos rodea.





COSMOLOGÍA

Agujeros negros primordiales

Juan García-Bellido y Sébastien Clesse

¿Se compone la materia oscura de agujeros negros creados una fracción de segundo después de la gran explosión?

ESPECIAL: EPITRANSCRIPTÓMICA

Nueva revolución en el estudio de la expresión de los genes

Cassandra Willyard

El epitranscriptoma del cáncer

Manel Esteller



AGRICULTURA

Xylella fastidiosa, la bacteria que está arrasando los olivares

Enrico Bucci

Un prolongado trabajo de análisis ha demostrado que este parásito es la causa de la enfermedad que ha devastado los olivos del sur de Italia. ¿Cómo se ha gestionado la plaga? ¿Cuál es la situación en España?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y Una nueva visión sobre los líquenes*; Miguel Ángel Vázquez Mozo: *El multiverso cuántico*; Luis Cardona: *La conducta animal en un mar cada vez más ácido*; Javier Grande: *El gran eclipse solar de 2017, Mil años de eclipses solares, El cielo en la Tierra, Joyas vivas y Un eclipse americano*; Xavier Roqué: *Un ensayo inédito de Churchill sobre la vida extraterrestre*; Daniel Sudarsky: *El problema de la mecánica cuántica*; Carlos Lorenzo: *El color genuino de los dinosaurios*; Bartolo Luque: *Lo veo, lo demuestro... pero ¿lo entiendo?*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España